



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ZEFEKTIVNĚNÍ VÝROBY SOUČÁSTKY DO LETECKÉHO MOTORU

STREAMLINING OF THE PRODUCTION OF A COMPONENT INTO THE AIRCRAFT ENGINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Bula

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Tomáš Bula**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce: **Ing. Aleš Polzer, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Zefektivnění výroby součástky do leteckého motoru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zadání diplomové práce je zaměřeno na zefektivnění stávající výroby součástky motoru letadla. Pozornost je nutno věnovat technologickému postupu, řezným nástrojům, způsobu upnutí atd.

Cíle diplomové práce:

- Charakteristika vybrané součástky leteckého motoru.
- Inovovaný návrh technologie výroby součástky.
- Technicko-ekonomické zhodnocení nově navrženého řešení.

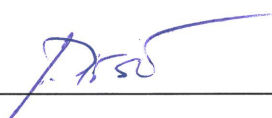
Seznam literatury:

- Davim Paul J.(2010): Surface Integrity in Machining. Springer, London.
- Tschätsch, H. (2009): Applied machining technology. Springer, Dordrecht.
- Davim Paul J. (2008): Machining: fundamentals and recent advances. Springer, London.
- Campbell, F. (2006): Manufacturing technology for aerospace structural materials. Elsevier, Amsterdam.
- Donachie Matthew, J. (2004): Titanium: a technical guide. Materials Park: ASM International.

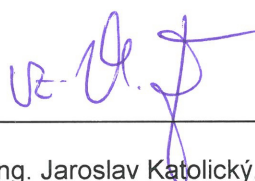
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 6. 11. 2015





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá inovací technologického postupu odlitku s názvem *Podpora ventilátoru* ve firmě Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. První část diplomové práce je zaměřena na funkci součásti *Podpora ventilátoru* z titanové slitiny Ti-6Al-4V. Součástí kapitoly je také popis proudového motoru TFE 731, ve které se součást nachází. Následně je věnována pozornost teoretickému rozboru materiálových vlastností titanových slitin a jejich obrobiteľnosti. V následující části jsou posouzeny alternativy výrobců strojů s následným výběrem pěti-osého CNC soustružnicko frézovacího centra DMC 80 U duoBLOCK disponující technologií Jetstream. Převod výroby na nový stroj je doprovázen změnou technologického postupu obráběcích operací, tvorbou nových přípravků a obměnou řezných nástrojů. Část kapitoly je také věnována statické analýze dílce numerickou metodou (MKP) v obráběcí operaci 7. V závěru práce jsou zhodnoceny náklady a úspory, kterých bylo dosaženo inovací technologického postupu.

Klíčová slova

slitina, CNC, výrobní proces, strojní čas, náklady

ABSTRACT

The thesis deals with innovation of the technological process of casting called *Fan support* in the company Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. The first part of the thesis is dedicated to component description which is made of titanium alloy Ti-6Al-4V. The section is also devoted to jet engine TFE 731, which is the engine where our particular component has specific function. Another part is focused on theoretical analysis of material characteristics of titanium alloys and their machinability. In the following section there are considered alternatives of machine suppliers with subsequent selection of the multifunctional CNC milling-turning center DMC 80 U duoBLOCK equipped with Jetstream technology. The transfer of the production to another machine is accompanied by an innovation of the technological process, making new fixtures and optimization of the cutting tools. The section is also dedicated to static analysis of the component in operation 7 supported by finite element method (FEM). The final part of the thesis includes evaluation of the costs and savings achieved by innovation of the technological process..

Key words

alloy, CNC, production process, labor time, costs

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BULA, Tomáš. *Zefektivnění výroby součástí do leteckého motoru*. Brno 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 73 s. 15 příloh. Vedoucí práce. Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Zefektivnění výroby součástí do leteckého motoru** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25.5 2016

Datum

Bc. Tomáš Bula

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Aleši Polzerovi, PhD. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Václavu Šlitrovi a firmě Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. za možnost zpracování diplomové práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	6
PODĚKOVÁNÍ	7
OBSAH.....	8
ÚVOD.....	10
1 CHARAKTERISTIKA SOUČÁSTKY DO PROUDOVÉHO MOTORU TFE 731 ..	11
1.1 Podpora ventilátoru.....	11
1.2 Dvou-hřídelový proudový motor TFE 731	12
2 VLASTNOSTI TITANU A JEHO SLITIN.....	13
2.1 Historie titanu	13
2.2 Výroba a použití titanu	13
2.3 Čistý titan.....	14
2.4 Mechanické vlastnosti titanu	15
2.5 Přednosti a nedostatky titanu	16
2.6 Slitiny titanu.....	16
2.6.1 Dělení slitin titanu.....	17
2.7 Vliv některých prvků na vlastnosti titanových slitin	18
2.8 Slitina Ti-6Al-4V	19
2.9 Mechanické vlastnosti Ti-6Al-4V při vybraných teplotách	20
3 OBROBITELNOST TITANOVÝCH SLITIN.....	21
3.1 Doporučení při obrábění slitin titanu	22
3.2 Mechanismus tvorby třísky u titanových slitin.....	22
3.3 Opatření řezných nástrojů při obrábění titanových slitin.....	23
3.4 Vlastnosti titanových slitin způsobující náročnou obrobiteľnost.....	25
3.4.1 Nízká tepelná vodivost titanových slitin.....	25
3.4.2 Vysoká afinita titanových slitin	26
3.4.3 Nízký modul pružnosti titanových slitin.....	27
3.4.4 Vznik zpevněné povrchové vrstvy při obrábění Ti-6Al-4V	27
3.4.5 Zbytková povrchová napětí v obrobeném materiálu Ti-6Al-4V	28
3.5 Trendy zvyšující produktivitu a životnost nástroje při obrábění Ti-6Al-4V	30
3.5.2 Vysokotlaké chlazení Jetstream.....	30
3.5.3 Efekt chlazení na třísku	32
3.5.4 Kryogenní chlazení.....	33
3.5.5 Kryogenní chladicí systém CO ₂	33

3.5.6 Trochoidní frézování	35
3.5.7 Nástroje pro trochoidní frézování	36
3.6 Doporučené třídy VBD vybraných výrobců pro soustružení Ti-6Al-4V	36
4 PŮVODNÍ A INOVOVANÁ TECHNOLOGIE VÝROBY SOUČÁSTI	39
4.1 Původní technologický postup obráběcích operací	39
4.2 Výběrové řízení na výrobní stroj	40
4.3 CNC soustružnicko-frézovací centrum DMC 80 FD duoBLOCK	40
4.4 Řídicí systém HEIDENHAIN TNC 640	41
4.5 Inovovaný technologický postup výroby s důrazem na obráběcí operace	41
4.5.1 Operace 6 - sloučená operace soustružení/vrtání/frézování	42
4.5.2 Operace 7 - sloučená operace soustružení/vrtání/frézování	46
4.6 Statická analýza	49
5 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	56
5.1 Technické zhodnocení	56
5.2 Ekonomické zhodnocení	56
5.2.1 Porovnání časů obráběcích operací	57
5.2.2 Náklady na strojní a přípravný čas na jeden kus	58
5.2.3 Roční náklady na výrobní časy obráběcích operací na výrobu 95 kusů	60
5.2.4 Úspory v řezných nástrojích	61
5.2.5 Náklady na přípravky	63
5.2.6 Celkové roční finanční úspory vzniklé inovovací technologického postupu	63
ZÁVĚR	64
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	65
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	71
SEZNAM PŘÍLOH	73

ÚVOD

V moderní letecké výrobě jsou často obráběny progresivní materiály, které disponují vysokou žáruvzdorností/žárupevností a vyznačují se náročnou obrobitelností. Jeden z takových materiálů (součást *Podpora ventilátoru*) byl obráběn v rámci řešení této diplomové práce. Dílec je součástí proudového motoru TFE 731, který je vysoce používán v mnoha obchodních proudových letadlech. Příkladem může být proudový letoun Learjet N45XR zobrazen na obr. 1.



Obr. 1 Proudový obchodní letoun Learjet N45XR poháněný dvěma motory TFE 731 [1].

V dnešní době bývá ve firmách trendem vyrobit součástku co nejefektivněji, pokud možno na nejméně upnutí a s co nejkratším výrobním časem. Aby bylo dosaženo zvýšení efektivity výroby *Podpory ventilátoru*, bylo nutné použít soustružnicko frézovací CNC centrum DMC 80 U duoBLOCK disponující technologií vysokotlakého chlazení Jetstream. Součástí práce, je návrh nového technologického postupu, jejímž cílem bylo snížit čas obráběcích operací a zredukovat počet upnutí součásti při výrobě.

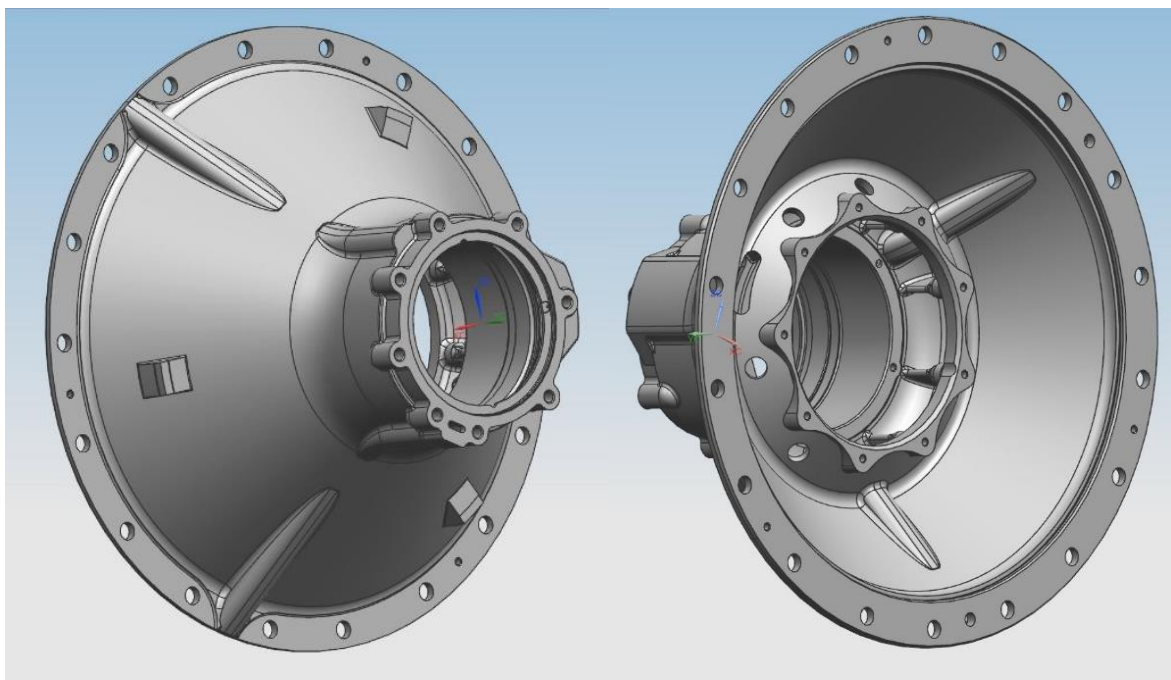
Diplomová práce je řešena ve spolupráci s firmou Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o., která sídlí v Hlubočkách v Mariánském Údolí u Olomouce. Firma se zabývá výrobou a opravou plechových dílů leteckých turbínových motorů z nerezavějících ocelí a speciálních slitin (hliníkových, niklových, kobaltových a titanových). Společnost Honeywell dodává komponenty pro většinu motorů a energetických jednotek. Vyráběné komponenty lze nalézt v mnoha dopravních letadlech typu Boeing a Airbus, v helikoptérách a obchodních letadlech typu Dassault, Falcon, Learjet, Cessna, Citation a dalších.

1 CHARAKTERISTIKA SOUČÁSTKY DO PROUDOVÉHO MOTORU TFE 731

V úvodní kapitole je zmíněn stručný popis řešené součásti *Podpora ventilátoru* a proudového motoru TFE 731, ve kterém se součást nachází.

1.1 Podpora ventilátoru

Úkolem součásti *Podpory ventilátoru* (obr. 2), je vytvářet podporu ventilátoru a zároveň slouží jako podpora kuličkového ložiska na hřídeli. Součást zároveň obsahuje dutiny, které plní funkci přívodu oleje k ložiskům, čímž je zajištěno neustálé mazání. Materiál součásti je titanová slitina Ti-6Al-4V, která plní jak pevnostní, tak tepelné požadavky součásti. Součást se nachází v přední části proudového motoru TFE 731 (obr. 3).



Obr. 2 3D model součásti *Podpora ventilátoru* přední/zadní pohled.

1.2 Dvou-hřídelový proudový motor TFE 731

TFE 731 zobrazený na (obr. 3) je dvou-hřídelový proudový motor, který byl certifikovaný v roce 1972. Od tohoto roku bylo vyrobeno více jak 11 000 jednotek ve 20 modifikacích. Motor je používán ve více jak 30-ti typech proudových obchodních letadel a nalétal přes 100 milionů letových hodin. Motory TFE 731 a jejich modifikace byly nejvíce aplikovány v obchodních letadlech, nicméně našly svoje uplatnění i ve vojenském průmyslu. Vývojem následujících modifikací motoru (-3, -4, -5, -20, -40, -50, -60) (příloha 1), bylo dosaženo zvýšení termodynamického tahu až na 5500 lbs [2, 3].



Obr. 3 Řez proudového motoru TFE 731 [4, 5].

2 VLASTNOSTI TITANU A JEHO SLITIN

V následující kapitole je popsána stručná historie objevení, výroby a použití titanu. Následně jsou v kapitole popsány možnosti aplikací titanu a jeho slitiny Ti-6Al-4V na základě jejich mechanických a fyzikálních vlastností.

2.1 Historie titanu

Jako první byl tento prvek objeven Williamem Gregorem v Anglii roku 1790 v podobě černého prášku (Ilmetit), který reagoval na magnet. William prášek nechal rozpustit v kyselině chlorovodíkové a sírové, roztok nechal odpařit a výsledkem byl bílý prášek TiO_2 . V roce 1795 byl tento prášek označen německým chemikem Martinem Klaprothem za nový prvek, který pojmenoval Titan po bájných postavách řecké mytologie Titánech. Až v roce 1875 se podařilo ruskému profesorovi Kirišlovovi získat laboratorně čistý titan. Téměř čistý titan (98%) se podařilo získat Francouzovi Muassanovi v roce 1885 a v roce 1910 byl izolován titan s čistotou 99,9 % Američanem Hanterem. Titan byl však křehký, jelikož obsahoval karbidy a nitridy titanu. V roce 1947 v Nevadě (USA) bylo vyrobeno prvních 45 kg komerčně čistého titanu. Během třech let tato produkce vzrostla na 700 tun ročně. Koncem poloviny 20. století, americké ministerstvo obrany stanovilo, že titan je vhodný kov pro aplikaci do vojenských letadel. Toto tvrzení bylo založeno na nízké hustotě titanu v kombinaci s vysokou pevností. První letadlo, při jehož výrobě se aplikoval titan, byl Douglas Aircraft X3 Stiletto [6].

Po celá desetiletí byl titan považován za "letecký kov" a byl používán výhradně pro tyto aplikace. Později se ukázalo, že má titan díky odolnosti vůči korozi využití i mimo letecký průmysl. Konkrétně se využíval na výrobu trubek pro výměníky tepla v elektrárnách. Tato aplikace se ukázala jako velmi úspěšná a tím se otevřel prostor pro nový trh.

Veliká naleziště titanové rudy byla objevena v Ilmenských horách na Urale. Podle toho byla ruda pojmenována na Ilmenit. Tvrdí se, že výrobu komerčně čistého titanu jako první zvládli Rusové a že jejich postup byl za doby studené války špiónážně odhalen a převeden do západní Evropy a USA. Tomu by nasvědčovaly i úspěchy kosmického programu sovětů v padesátých letech. V České republice nejsou titan ani jeho slitiny normovány. V malé míře, ale dobré kvalitě byla jeho výroba zvládnuta v devadesátých letech v Poldi Kladno a.s., kde se vyráběl čistý titan a slitiny typu $\alpha+\beta$ [7].

2.2 Výroba a použití titanu

Titan nalézá své využití v leteckém průmyslu, kosmonautice, medicíně a dnes už i v gastronomii a automobilovém průmyslu. Od doby co se zjistilo, že titan nereaguje s lidským tělem, začal se využívat pro výrobu umělých kloubů. Přesto nejpoužívanější produkt titanu je oxid titaničitý (TiO_2), který má využití v celé řadě odvětví (plnivo ve výrobě papírů, pigment, tavidlo při lepení skla a další). Pouze 6 % produkce připadá na výrobu kovového titanu. Faktem je, že vysoká cena omezuje použití titanu v jiných odvětvích [8].

Horninou pro výrobu titanu je rutil (obr. 10), který obsahuje až 90 % TiO_2 a Ilmenit (obr. 5), ve kterém je obsaženo 40-60 % TiO_2 . Uměle vyrobený oxid titaničitý je bílý prášek, nazývaný „titanová běloba“ a je využíván jako pigment v nátěrových hmotách (obr. 6) [7, 9].



Obr. 4 Rutil [10].



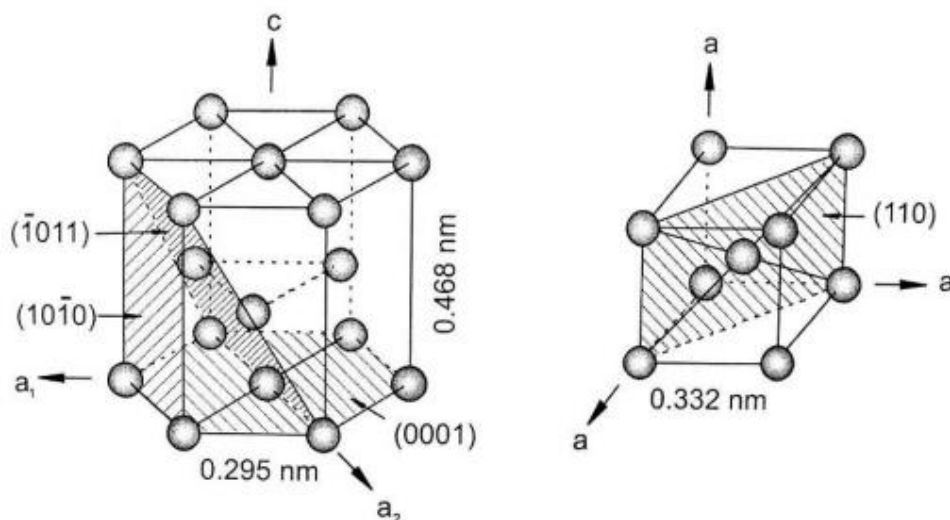
Obr. 5 Ilmenit [11].



Obr. 6 Minerální pigment [12].

2.3 Čistý titan

Titan je devátý nejrozšířenější prvek na Zemi a tvoří tak 0,6 % zemské kůry [13]. Titan je polymorfní lehký kov, který se vyskytuje ve dvou modifikacích. Při teplotě okolo 880 °C se fáze α s hexagonální mřížkou (HCP) mění na fázi β s mřížkou kubickou prostorově středěnou (BCC). BCC mřížka je stabilní až do teploty bodu tání 1668 °C [14]. Schematické struktury mřížek HCP α -titanu a BCC β -titanu jsou uvedeny na obr. 7. Vyšrafované roviny znázorňují místa nejvíce obsazené atomy.

Obr. 7 Krystalické mřížky fází α a β [15].

Tab. 1 Přehled některých fyzikálních vlastností titanu [16].

Značka	Ti
Atomové číslo	22
Elektronegativita	1,54
Relativní atomová hmotnost	47,867
Teplota tání [°C]	1670
Teplota varu [°C]	3287
Koeficient tepelné roztažnosti [$\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$]	8,41
Hustota [kg/m^3]	4500

Tab. 2 Srovnání některých vlastností titanu s některými prvky [17].

Vlastnost	Ti	Fe	Ni	Al
Teplota tání [°C]	1670	1538	1455	660
Kystalová struktura	bcc- hcp	fcc-bcc	fcc	fcc
Modul pružnosti [GPa]	116	215	200	72
Hustota [Kg/m ³]	4500	7800	8900	2700

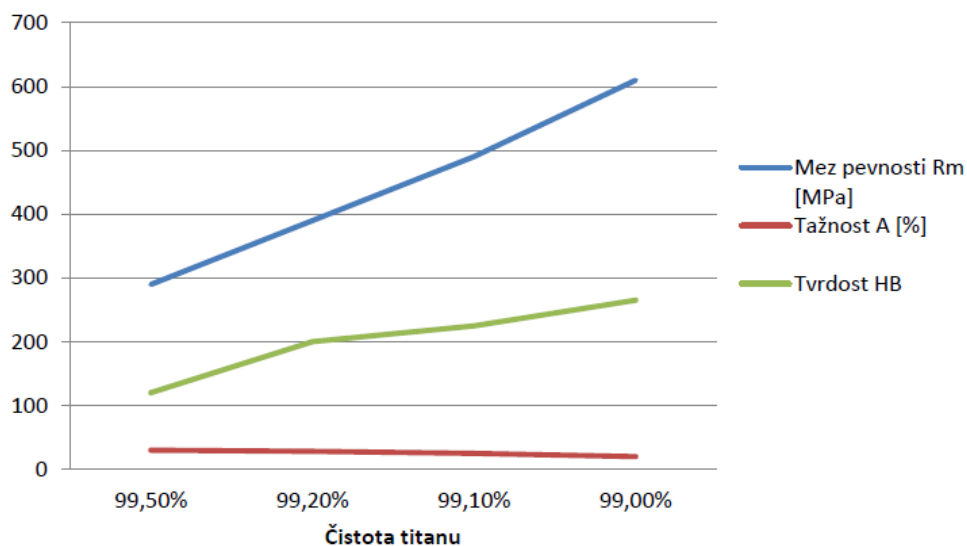
2.4 Mechanické vlastnosti titanu

Mechanické vlastnosti titanu závisí na jeho čistotě (tab. 3), především na obsahu kyslíku, dusíku, uhlíku a železa. Pevnost titanu se dá podstatně zvýšit tvářením za studena.

Tab. 3 Závislost některých mechanických vlastností na čistotě titanu [18].

Druh titanu	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A [%]	Tvrдость HB
Ti 99,5	290	30	120
Ti 99,2	390	28	200
Ti 99,1	490	25	225
Ti 99,0	610	20	265

Z grafu vyplývá (obr. 8), že s klesající čistotou tažnost titanu klesá, naopak mez pevnosti a tvrdost podle Brinela stoupá.



Obr. 8 Mechanické vlastnosti titanu v závislosti na čistotě [19].

2.5 Přednosti a nedostatky titanu

Titan je v průmyslu využíván díky svým mechanickým a tepelným vlastnostem. Tyto vlastnosti však značně ztěžují jeho zpracování, které se odráží ve zvýšených nákladech. Přesto je titan v průmyslu díky svým vlastnostem velmi žádaný.

Přednosti titanu [20]

- nižší hustota oproti ocelím ($\rho = 4.55 \text{ g/cm}^3$),
- vysoká specifická pevnost při 250 – 500 °C, kde už nelze použít Al, Mg,
- vysoká pevnost i při záporných teplotách,
- odolnost proti únavovému namáhání (povrch bez vrubů a rýh),
- vynikající korozní odolnost (velmi stabilní vrstva oxidu Ti),
- nízká teplotní roztažnost => nízká tepelná napětí.

Nedostatky titanu [20]

- vysoké výrobní náklady => vysoká cena (~8x vyšší než u Al),
- chemická reaktivita nad 500 °C – intenzivní reakce s O_2 , H_2 , N_2 ,
- nižší modul pružnosti oproti ocelím ($E = 210 \text{ GPa}$),
- špatné třecí vlastnosti, sklon k zadírání,
- špatná obrobiteľnosť (nízká teplotní vodivost → místní přehřívání, nalepování na nástroj, nad 1200 °C nebezpečí vznícení třísek a Ti prachu),
- problémy při svařování (slučivost s atmosférickými plyny => nutnost svařování v ochranné atmosféře, difúzně, laserem),
- speciální zpracovatelské technologie (tavení a tepelné zpracování ve vakuu nebo ve vysoce čisté inertní atmosféře).

2.6 Slitiny titanu

Čistý titan je vyznačován poměrně nízkou mezí kluzu a mezí pevnosti. Aby byla zvýšena pevnost titanu, případně další vlastnosti, začaly se vyrábět slitiny titanu. Přísadové prvky mají v obou alotropických modifikacích titanu úplnou nebo částečnou rozpustnost. U titanu stabilizují buď fázi α (mřížka HCP), fázi β (mřížka BCC), nebo s titanem mohou tvořit intermetalické sloučeniny, které se označují jako fáze γ . Výhodou titanových slitin je jejich vysoká měrná pevnost a vysoký rozsah pracovních teplot. Nevýhodou titanových slitin je jejich vysoká pořizovací cena, zapříčiněná nákladnou výrobou a zpracováním (tavení a odlévání ve vakuu nebo ochranné atmosféře argonu, obtížná obrobiteľnosť a horší svařitelnost než čistý titan, vysoký součinitel tření). V současnosti je známo přes 100 druhů slitin titanu, přesto pro komerční využití je používáno pouze 20-30 typů. Podle oblasti použití mohou být titanové slitiny děleny na slitiny pro tváření a odlitky, podle struktury základních fází v rovnovážném stavu případně podle procentuálního zastoupení legujících prvků. Titanové slitiny vykazují unikátní kombinaci mechanických, fyzikálních a chemických vlastností, kterými se stávají velmi žádanými do oblastí, jako jsou převážně letectví a kosmonautika, medicína, chemický a energetický průmysl [21, 22, 23].

2.6.1 Dělení slitin titanu

Slitiny titanu se obvykle dělí podle struktury základních fází v rovnovážném stavu do pěti skupin [9].

- slitiny α ,
- slitiny pseudo α ,
- slitiny $\alpha + \beta$,
- slitiny pseudo β ,
- slitiny β ,

Slitiny α

Jsou charakteristické dobrou pevností a odolností proti křehkému lomu i za velmi nízkých teplot. I při 600 °C jsou schopné odolávat oxidaci. Slitiny α mají stabilní strukturu a jsou lépe obrobitelné i svařitelné. Jejím nedostatkem je poměrně vysoká vodíková křehkost. Jako hlavní přísady jsou používány prvky hliník, zirkon a cín. Žíhání se zpravidla používá jako tepelné zpracování těchto slitin. Slitiny α jsou často použity v součástech plynových turbín, leteckém a chemickém průmyslu [8, 36].

Slitiny pseudo α

Mimo α -fáze tyto slitiny obsahují díky přidání menšího množství β -stabilizátorů 2-8 % β -fáze. Mimo uvedené vlastnosti α -slitin mají kvůli přítomnosti β -fáze menší citlivost k vodíkové křehkosti a lepší plasticitu. Pevnost slitin je měněna v závislosti na obsahu hliníku od 500 MPa (1 % Al) až do 1100 MPa (7 % Al). Z těchto slitin jsou často vyráběny kompresory a draky letadel [8, 36].

Slitiny $\alpha+\beta$

Nejpočetnější skupinou jsou dvoufázové heterogenní slitiny $\alpha+\beta$. Mají lepší odolnost vůči únavovému namáhání, obrobitelnost a tvárnost než slitiny α i pseudo α . Nicméně jejich lomová houževnatost a svařitelnost je horší. Podíl β -fáze se pohybuje v rozmezí 5-50 %. Mechanické vlastnosti jsou ovlivněny tepelným zpracováním. Využití těchto slitin je často na součásti leteckých motorů, kryogenních součástí, tlakových nádob, zbraní a podobně [8, 36].

Slitiny pseudo β

Obsahují kolem 20 % β -stabilizátorů, především železo a chrom, které tvoří intermetalické fáze. Jsou dobře tvárné, lze je tedy využít pro lisování nebo kování součástí složitějšího tvaru. Slitiny pseudo β jsou používány převážně v žíhaném stavu [8, 36].

Slitiny β

Tyto slitiny disponují vysokou odolností vůči korozi, tvárností, pevností, ale za to nízkým modulem pružnosti. Slitiny mají větší měrnou hmotnost díky legujícím prvkům a jejich výroba je velmi obtížná a tedy i nákladná. Díky BCC mřížce jsou nejvhodnější ke tváření. Oblast jejich využití je však poměrně malá (vysoce pevné svorníky, panely letadel a kosmických lodí) [8, 36].

Tab. 4 Pozitivní a negativní vlastnosti α , α - β a β titanových slitin [24].

Vlastnost	α	α - β	β
Hustota	+	+	-
Pevnost v tahu	-	+	++
Tažnost	-/+	+	-/+
Lomová houževnatost	+	-/+	-/+
Odolnost vůči creepu	+	-/+	-
Odolnost vůči korozi	++	+	-/+
Odolnost vůči oxidaci	++	-/+	-
Svařitelnost	+	-/+	-
Tváření za studena	--	-	-/+

2.7 Vliv některých prvků na vlastnosti titanových slitin

Kyslík a dusík

Dobře rozpouštějí v obou krystalových modifikacích. Stabilizují výrazně fázi Alfa. Již při malém množství (desetiny %) výrazně zvyšují pevnost a snižují plasticitu.

Uhlík

Za normální teploty pod 0,25 %. Do tohoto obsahu zvyšuje mechanické vlastnosti. Nad 0,25 % vzniká karbid titanu TiC. Jeho množství se ve slitinách udržuje pod hodnotu 0,1 %.

Vodík

Způsobuje precipitaci hydridu titanu – pokles houževnatosti. Obsah pod 0,01 %.

Železo

Je obvyklou nečistotou v titanových slitinách. Přichází do titanu při jeho výrobě redukcí. Při obsahu pod 0,1 % je jeho vliv zanedbatelný.

Křemík

Křemík se vyskytuje v titanu a jeho slitinách jako nečistota do 0,2 %. Působí negativně na houževnatost. Obsah se udržuje pod 0,1 % [25].

2.8 Slitina Ti-6Al-4V

Slitina Ti-6Al-4V je jedna z nejpoužívanějších a nejčastěji vyráběnou slitinou titanu. Ti-6Al-4V je označovaná také jako VT6 a patří do skupiny slitin s dvoufázovou strukturou $\alpha+\beta$. Přeměna $\alpha+\beta \rightarrow \beta$ při 995 °C. Jedná se o vysoce pevnou slitinu, která má velmi dobrý poměr hustoty k pevnosti. Její mechanické vlastnosti (tab. 6) je možné dále zlepšovat pomocí tepelného zpracování, jako je žíhání či zušlechťování, které zvýší pevnost o 15-25 %. Slitina je vytvrditelná až na 1100 MPa do tloušťky 25 mm. Je vhodná především pro tváření za tepla, ale je možné ji také odlévat. Zpracování tvářením za studena se nedoporučuje, z důvodu její vysoké pevnosti a nízkému modulu elasticity. Při tepelném zpracování se obvykle upřednostňuje ohřev v elektrické peci a pracuje se v inertní atmosféře či ve vakuu.

Slitina se vyrábí v různých variantách s různými legurami. Slitina je dobře svařitelná a její použitelnost se pohybuje v teplotním rozmezí -210 až +400 °C. Tyto slitiny, vykazují vynikající únavové vlastnosti, odolnost vůči iniciaci trhlin i jejím šíření. Díky ochranné oxidické vrstvě slitina výborně odolává korozi a to i v agresivním prostředí. V případě porušení oxidické vrstvy je její obnovení v prostředí obsahujícím kyslík velmi rychlé. Další příznivou vlastností je výborná biokompatibilita s lidskou tkání a kostmi, která umožňuje široké použití slitiny v lékařství (obr. 9, 10) a pro výrobu šperků [19, 20].

Použití:

- vojenský průmysl
- šperkařství
- výroba lodí
- energetika
- součásti v leteckém průmyslu
- implantáty v chirurgii



Obr. 9 Dřík náhrady kyčelního kloubu-slitina Ti-6Al-4V [26].



Obr. 10 Zubní implantát [27].

Tab. 5 Chemické složení slitiny titanu Ti-6Al-4V [28].

Prvek	Ti-6Al-4V odlitek	Ti-6Al-4V výkovek
Al	5,5-6,75 %	5,5-6,75 %
V	3,5-4,5 %	3,5-4,5 %
C	0,1 %	0,08 %
Fe	0,3 %	0,3 %
O	0,2 %	0,2 %
N	0,05 %	0,05 %
H	0,015 %	0,015 %
Ti	zbytek do 100 %	zbytek do 100 %

Tab. 6 Mechanické vlastnosti Ti-6Al-4V, skupina 5, pro teplotu 20-25 °C [29].

Vlastnosti	Typická hodnota
Pevnost v tahu [MPa]	900 (897-1100)
Mez kluzu [MPa]	830 (800-1000)
Yongův modul pružnosti [GPa]	114 (110-140)
Tvrdost [HRC]	36 (30-40)
Tažnost materiálu [%]	14 (10-18)
Vrubová houževnatost Charpy [J]	22 (20-27)

2.9 Mechanické vlastnosti Ti-6Al-4V při vybraných teplotách

S klesající teplotou roste pevnost, tvárné vlastnosti výrazně klesají až při velmi nízkých teplotách jak je patrné z tab. 7.

Tab. 7 Vlastnosti slitiny při rozdílných teplotách (deska tloušťky 6,4 mm, vytvrzeno) [20].

Teplota [°C]	Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
-196	1855	1730	4	6
-79	1460	1360	12	29
20	1255	1165	14	45
171	1075	925	17	56
427	910	705	16	67

3 OBROBITELNOST TITANOVÝCH SLITIN

Obrobitelnost materiálu je technologická vlastnost, která je charakterizována mírou jeho schopnosti být zpracován některou z metod obrábění. Pojem „obrobitelnost“ je tedy veličinou vztahu nástroje a obrobku. Pod tímto pojmem se rozumí souhrnný vliv fyzikálních vlastností a chemického složení obráběného materiálu na průběh konkrétního procesu obrábění.

Titanové slitiny jsou všeobecně zařazené mezi těžkoobrobitelné materiály. Vlastnosti jako nízká měrná tepelná kapacita, vysoká teplota tavení a nízká teplotní vodivost mají za následek generování vysokých teplot v místě řezu a tím je zvýšeno nebezpečí plastické deformace břitů a jeho okamžité porušení. Dále pro obrábění titanových slitin je charakteristické zpevňování v oblasti primární plastické deformace při procesu řezání a tvoření nárůstku [30].

Tab. 8 Důsledek mechanického a tepelného účinku na vlastnost obrobené plochy vyvolané procesem řezáním [31].

VLIV PROCESU ŘEZÁNÍ	ÚČINEK	VLASTNOST OBROBENÉ PLOCHY
<u>Podmínky obrábění</u> Řezná rychlost Posuv Hloubka řezu	Mechanický →	Plastická deformace Deformační zpevnění Tlaková pnutí
<u>Nástroj</u> Materiál Geometrie Opotřebení Prostředí Řezná kapalina Za sucha	Tepelný →	Fázová transformace Změna tvrdosti popouštěním Znovu zakalení Tahová pnutí Napětí v důsledku strukturních transformací

3.1 Doporučení při obrábění slitin titanu

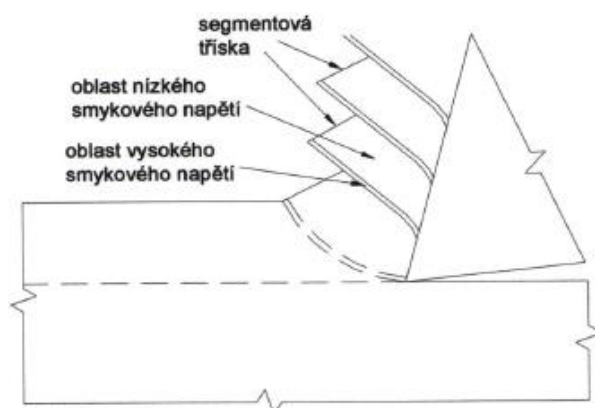
Abychom zefektivnili obrábění titanových slitin, je třeba dodržovat některých zásad [32]:

- používat procesní kapaliny, jejímž cílem je odvod tepla z místa řezu, čistý povrch od třísek, snížení velikosti řezných sil a prodloužení trvanlivosti nástrojů,
- zabránit práci s již opotřeбенými nástroji (pro obrábění slinutými karbidy je kritická hodnota opotřebení na hřbetě $VB=0,3$ mm),
- musí být zajištěný pravidelný, stálý záběr,
- používat pozitivní geometrii nástroje z důvodu dosažení požadované jakosti povrchu,
- zajistit pokud možno co největší tuhost soustavy, aby byly vyloučeny vynucené a samobuzené kmity při obrábění,
- používat vyšší hodnoty posuvů a hloubky řezu, jelikož vzniká nebezpečí zpevňování.

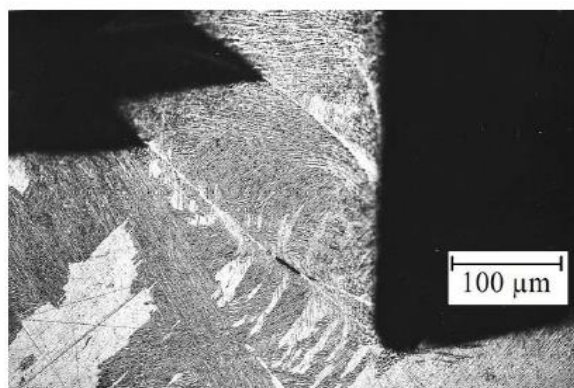
3.2 Mechanismus tvorby třísky u titanových slitin

Třísku lze definovat jako odřezávanou část materiálu z obrobku. Při vníkaní řezného klína dochází k intenzivní plastické deformaci podél roviny maximálních smykových napětí (střížné roviny). Samotná tříska je nositelem spousty informací o tom jak proces probíhal. Na základně tvaru, deformace a zbarvení třísky si lze představit charakter nově vzniklého povrchu, charakter zpevňování nebo odpevňování při řezání a podobně.

Charakteristickým znakem při obrábění titanových slitin je vytváření segmentové třísky (obr. 11), což je způsobeno tepelnou nestabilitou při její tvorbě. Tříska tvoří jednotlivé segmenty, pro které je velikost plastické deformace v rámci jejich objemu poměrně malá. Naopak úzké oblasti mezi segmenty (smykový pás) se vyznačují poměrně vysokou plastickou deformací smykem (smyková nestabilita v oblasti primární plastické deformace). Tato oblast je označována jako *adiabatický katastrofický stříhový pás*. Vznik takového pásu je projevem smykové nestability deformace a vzniká jako důsledek odpevnění při koncentraci tepla a špatné tepelné vodivosti deformovaného materiálu [30].



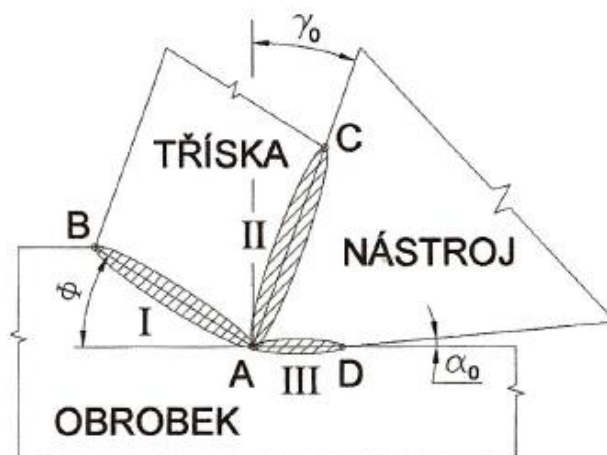
Obr. 11 Segmentová tříska [32].



Obr. 12 Utváření kořene třísky slitiny Ti6Al4V při $v_c=60$ [m.min⁻¹] $f_n=0,15$ [mm] [31].

Při vzniku třísky se deformovaná oblast materiálu vlivem řezného nástroje nazývá *kořenem třísky*. Kořen třísky zahrnuje tři oblasti výrazné plastické deformace znázorněné na obr. 13 [33]:

- oblast *primárně plastické deformace materiálu I* – v rovině maximálních smykových napětí vymezené rovinnou AB, skloněnou pod úhlem střížné roviny ϕ ,
- oblast *sekundární plastické deformace materiálu II* – zahrnuje tření třísky po čele nástroje mezi body AC,
- oblast *terciální plastické deformace materiálu III* – zahrnuje tření nástroje o obrobený povrch materiálu mezi body AD a má vliv na výslednou kvalitu obrobeného povrchu,

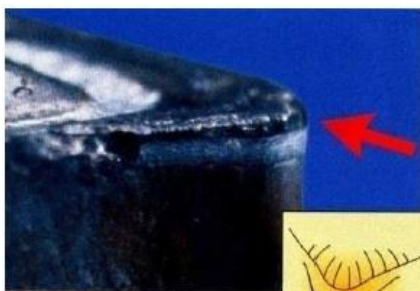


Obr. 13 Schematické znázornění oblasti plastických deformací v kořenu třísky [33].

3.3 Opotřebení řezných nástrojů při obrábění titanových slitin

Opotřebení nástrojů při obrábění titanových slitin je zapříčiněno především vysokým součinitelem tření s ostatními kovy a nízkou tepelnou vodivostí titanu. Malá plocha kontaktu třísky s čelem nástroje má za následek generování velkého množství tepla v místě řezu a následně vysoké lokální tepelné namáhání nástroje. Následkem toho se při obrábění titanu odvádí až 80 % generovaného tepla do nástroje. Na obr. 19 je pozorování teplotního pole při obrábění uhlíkové oceli a titanové slitiny za stejných řezných podmínek.

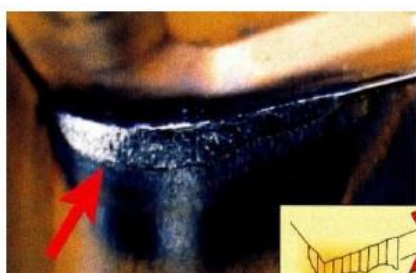
Velmi častými projevy degradace nástroje při obrábění titanových slitin jsou hřbetní opotřebení VB, čelní opotřebení KT, plastická deformace nástroje a tvoření nárůstku (obr. 14-17) [34].



Obr. 14 Plastická deformace břitu [35].



Obr. 15 Tvorba nárůstku [35].



Obr. 16 Hřbetní opotřebení VB [35].



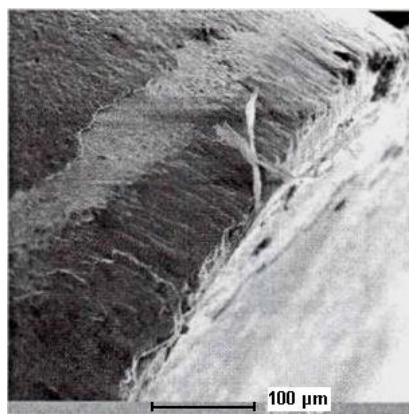
Obr. 17 Čelní opotřebení KT [35].

Nízká odolnost nástrojového materiálu proti opotřebení, případně příliš vysoká řezná rychlost má za následek rychlé opotřebení nástroje na hřbetě VB. Tím vzniká nežádoucí jakost obrobených ploch či dokonce nedodržení předepsaných tolerancí. Opatření vůči nadměrnému opotřebení na hřbetě je doporučeno snížení řezné rychlosti, zvolení nástrojového materiálu s vyšší odolností proti opotřebení, případně použití nástroje povlakované oxidickou keramikou (Al_2O_3 , či zvolit cermetovou třídu). U materiálů, kde dochází ke zpevňování při jejich obrábění (titan) je doporučeno zvolit menší úhel nastavení α_r [35].

Výmol na čele nástroje ve tvaru žlábků KT je důsledkem vysokých řezných teplot a na straně čela dochází k difuznímu opotřebení. Žlábek na čele způsobuje zeslabení břitu a může dojít k jeho vylomení, což vede ke snížení jakosti obrobených ploch. Jako opatření proti kráterovému opotřebení na čele je doporučeno snížit řeznou rychlost, případně posuv a zvolit VBD s pozitivní geometrií či použít nástroje povlakované Al_2O_3 [35].

Plastická deformace břitu je způsobena vysokými řeznými teplotami za současného působení vysokých měrných tlaků v místě řezu. Následkem toho dochází ke změně v geometrii, následně špatnou kontrolu třísky což vede k nevyhovující jakosti obrobených ploch, případně ke zlomení břitové destičky. Proti plastické deformaci břitu, je možné se bránit snížením řezné rychlosti a použitím třídy slinutých karbidů, s lepší odolností proti plastické deformaci [35].

Při tvorbě třísky obráběním titanových slitin je dále charakteristické intenzivní tření mezi třískou a plochou čela. Z tohoto důvodu je nutno zvážit povlakování nástrojů při soustružení titanových slitin. Z výzkumů vyplynulo, že povlak má na trvanlivost méně významný vliv a po několika sekundách je odstraněn z řezné hrany (obr. 18). Zvýšení trvanlivosti lze dosáhnout použitím jemnozrnných slinutých karbidů na bázi WC [37, 30].



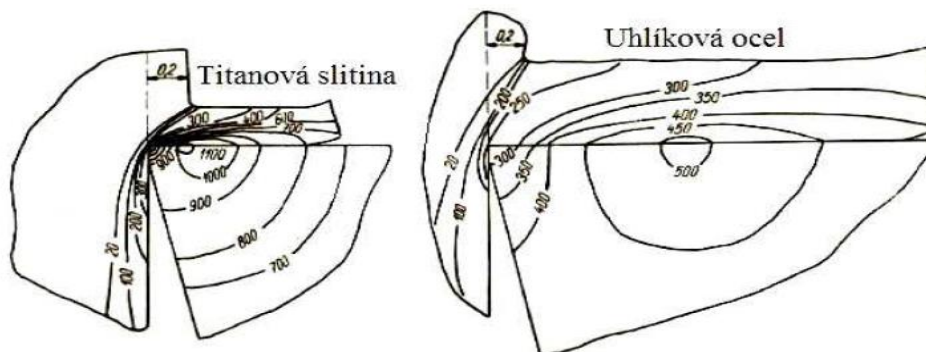
Obr. 18 Odstranění povlaku z řezné hrany slinutého karbidu při soustružení titanové slitiny Ti-Al6-Mo2-Cr2-Fe-Si, $v_c = 60 \text{ m.min}^{-1}$ [37].

3.4 Vlastnosti titanových slitin způsobující náročnou obrobitelnost

Přes všechny přednosti mají titanové slitiny jeden závažný nedostatek – obtížnou obrobitelnost a s ní spojené opotřebení nástrojů a dlouhé pracovní časy, které znemožňují větší automatizaci obráběcích procesů. Na proces obrábění působí celá řada faktorů, které negativně ovlivňují obrobitelnost těchto slitin.

3.4.1 Nízká tepelná vodivost titanových slitin

Vlivem řezného procesu při obrábění titanových slitin vznikají vysoké teploty. Z důvodu špatného odvodu tepla do třísky a obrobku lze pozorovat vysokou koncentraci tepla na řezné hraně nástroje (obr. 19).



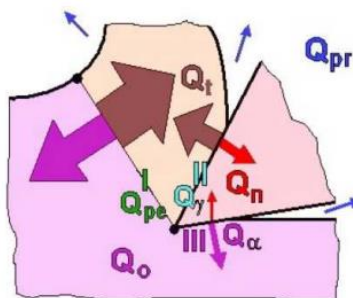
Obr. 19 Teplotní pole při obrábění uhlíkové oceli a titanové slitiny [38].

Teplo Q_e , které je transformované přeměnou z práce E_e řezného procesu, musí být v rovnováze s teplem odvedeným z této soustavy. Za tohoto předpokladu lze sestavit tzv. „rovnici tepelné bilance řezného procesu“ (3.1) [39].

$$Q_{pe} + Q_{\gamma} + Q_{\alpha} = Q_t + Q_n + Q_o + Q_{pr} = Q_e \approx E_e \text{ [J]} \quad (3.1)$$

kde:

- Q_{pe} - teplo generované elastickými a plastickými deformacemi v oblasti I,
- Q_{γ} - teplo vzniklé třením třísky o čelo nástroje v oblasti sekundární deformace II,
- Q_{α} - teplo z tření hlavního hřbetu nástroje o tzv. přechodovou plochu, oblast III,
- Q_t - teplo odváděné třískou,
- Q_n - teplo odcházející do nástroje,
- Q_o - teplo odváděné do obrobku,
- Q_{pr} - teplo odváděné řezným prostředím [39].

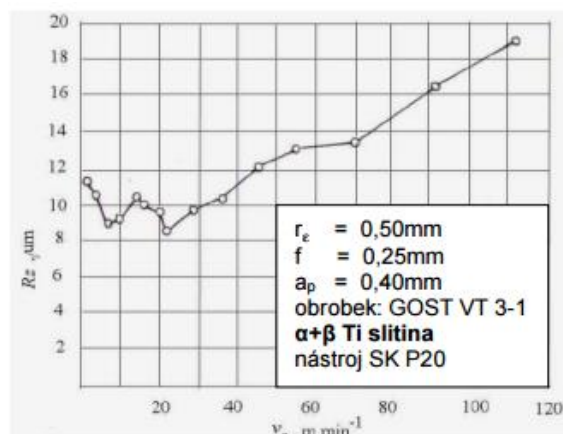


Obr. 20 Distribuce tepla při obrábění [39].

3.4.2 Vysoká afinita titanových slitin

Chemická afinita může být definována jako ochota atomu nebo sloučeniny reagovat s jiným atomem nebo sloučeninou. Tím je umožněno určitým chemickým látkám tvořit chemické sloučeniny. Vysoká chemická reaktivita titanu a jeho stupeň afinity k většině materiálů vede k výraznému difuznímu, a také adheznímu opotřebení. To je způsobeno oslabením řezného materiálu a zhoršením jakosti obrobené plochy. V případě titanu reaktivita roste se zvyšující se teplotou v místě styku obráběné plochy a nástroje [40].

Vysoká afinita titanových slitin (především k prvkům O, C, N, H, včetně řezných materiálů PCD, řezné keramiky či PCBN) má za následek specifický průběh závislosti nejvyšší výšky nerovnosti (profilu na určité délce) R_z na řezné rychlosti v_c , $R_z = f(v_c)$. Na grafu (obr. 21) je znázorněna poměrně úzká oblast řezných rychlostí, při kterých je obrobený titanový povrch kvalitní [41]. V případě, že by došlo k překročení intervalu, dochází ke zhoršování kvality povrchu. Mimo jiné, také díky působením vyššího adhezního opotřebení nástroje a vibracím [40].



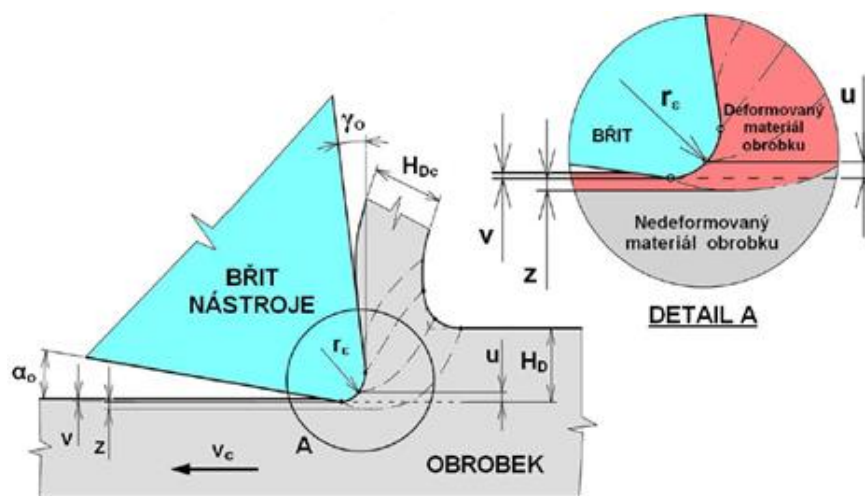
Obr. 21 Závislost R_z (největší výška profilu) obrobene plochy na řezné rychlosti v_c [41].

3.4.3 Nízký modul pružnosti titanových slitin

Pro titanovou slitinu Ti-6Al-4V je Yongův modul pružnosti v tahu $E=114$ GPa (tab. 6). Pro porovnání s běžnými druhy oceli, je např. pro ČSN 12 050 (C45, DIN 1.1191) $E(1.1191) = 211$ GPa. Díky této vlastnosti titanu a jeho slitin dochází při obrábění k tzv. „odtláčování materiálu“ od nástroje, především pokud se jedná o menší hodnoty záběru, například při obrábění žeber a tenkostěnných obrobků. Poté, co pomine působení řezných sil a odporů, „odpružený“ materiál se vrací zpět, což způsobuje problémy s rozměrovou i geometrickou přesností obrobene plochy. Tento jev lze významně eliminovat správnou volbou řezných úhlů. Doporučeno je použít vždy ostrý nástroj s pozitivní geometrií čela břitů (kolem 15°). Použitím pozitivních řezných úhlů se dosáhne redukce velikostí řezných sil a tím i redukce odtlačení obrobku od místa řezu [42].

3.4.4 Vznik zpevněné povrchové vrstvy při obrábění Ti-6Al-4V

Pod pojmem *zpevněná povrchová vrstva* si lze představit zvýšení tvrdosti a pevnosti obrobeneho povrchu vlivem tepla, tribologie a působením primární plastické deformace. Stupeň zpevněné povrchové vrstvy lze kvantifikovat mikrotvrdostí a hloubkou zpevnění. Největší mikrotvrdost má při obrábění tříska, zabržděná vrstva a zpevněná povrchová vrstva, eventuálně nárůstek na břitu nástroje. Směrem od povrchu obrobene plochy do středu materiálu tato tvrdost a pevnost klesá až na hodnotu odpovídajícímu základnímu materiálu obrobku. Intenzita a hloubka zpevnění povrchové vrstvy, závisí na vlastnostech materiálu, geometrii nástroje a řezných podmínkách obrábění. Dalším důležitým faktorem při tvorbě zpevněné povrchové vrstvy je zvolený úhel čela nástroje γ . Se zmenšujícím se úhlem čela je ovlivněn *úhel hranice primární plastické deformace* Φ , z toho vyplývá, že roste oblast a intenzita primární plastické deformace a tedy i zpevnění povrchové vrstvy obrobeneho povrchu. Zmenšením úhlu Φ , se zintenzivňuje pronikání plastické deformace do hlubších vrstev obrábeneho povrchu. Naopak vyšší úhel Φ způsobuje tvorbu štihlejší třísky a řezný proces je energeticky výhodnější [40].



Obr. 22 Vznik tvorby zpevněné povrchové vrstvy při třískovém obrábění v důsledku poloměru zaoblení špičky nástroje r_c . Pohled na ortogonální řezání [40].

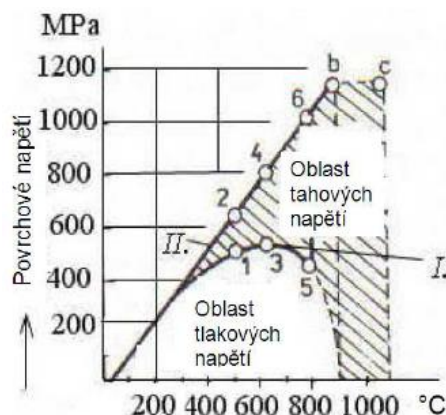
Na obr. 22 je znázorněno, že vlivem poloměru zaoblení ostří r_c neodchází malá část odebíraného materiálu pryč z řezu ve formě třísky. Tato část je po překročení meze kluzu trvale deformována na povrchu obrobku (hloubka z). Bod, v němž k rozdělení dochází, je definován jako tečný bod střižné (smykové) roviny k poloměru zaoblení špičky r_c . Hloubka u , znázorňuje část třísky deformované v oblasti elasticity v důsledku zaoblení ostří r_c . Po projetí nástroje a pomínutí napětí vyvolaných vnikáním břitu do obrobku se elasticky stlačená vrstva u vrátí zpět do původního stavu. Z toho vyplývá, že obrobek je zvětšen díky této stlačené vrstvě o hodnotu v [40].

Dále důsledkem vysokého součinitele smykového tření titanových slitin (0,3-0,36) vzniká prudké zabrzdění kovu na plochách nástroje. Dochází tak k vytvoření vysokého gradientu rychlosti obtékání těchto vrstev. Následkem toho zabržděná vrstva částečně zatéká na tvořící se obráběnou plochu a vytváří tak zpevněnou povrchovou vrstvu. U materiálů s nižším koeficientem tření, roste rychlost pohybu třecích ploch mezi třískou, obrobkem a nástrojem, čímž se snižuje gradient rychlosti obtékání těchto vrstev a zpevnění neproniká do takové hloubky jako u titanových slitin [43, 44].

Na vznik zpevněné povrchové vrstvy přispívá již výše zmíněná vysoká afinita titanu a titanových slitin ke většině chemických prvků. K difuznímu procesu dochází mezi nástrojem, obrobkem a okolím. Při teplotách nad 600 °C dochází k tvorbě oxidů a vzniku zpevněné povrchové vrstvy [45, 46].

3.4.5 Zbytková povrchová napětí v obrobeném materiálu Ti-6Al-4V

Povrchová napětí mají výrazný vliv na požadované vlastnosti součástí. Ovlivňují schopnost součástí odolávat dynamickým zatížením, odolnosti proti opotřebení (tření), korozivzdornost, jakost povrchu a přesnost. Důležitými faktory při tvorbě zbytkových napětí v povrchové vrstvě je nerovnoměrná plastická deformace, teplota a její rozdíly v jednotlivých vrstvách v kombinaci s vysokými tlaky při obrábění. V ideálním případě vznikají na obrobeném povrchu napětí tlaková, které pozitivně ovlivňují únavovou pevnost povrchu, jinými slovy omezují vznik a šíření povrchových trhlin. Na obr. 23 je závislost a rozdělení druhů povrchových napětí na teplotě ohřevu povrchové vrstvy [44].

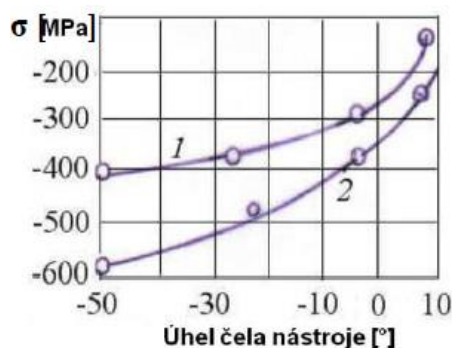


Obr. 23 Druhy povrchových napětí v závislosti na teplotě [52].

Při obrábění titanových slitin dochází k intenzivnímu ohřevu povrchové vrstvy a vzniká tak i vnitřní tahové napětí σ . Plastická deformace v povrchové vrstvě může vzniknout pouze v případě, že toto napětí způsobené ohřevem je vyšší, než mez kluzu obráběného materiálu R_e .

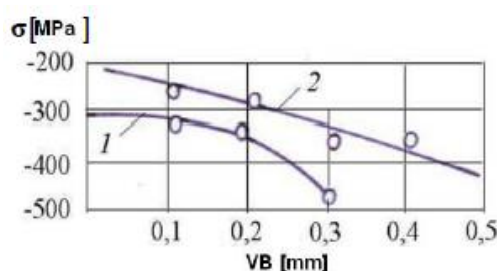
Dále řezné podmínky mají významný vliv na velikost plastické deformace a distribuci tepla, proto lze očekávat i výrazný vliv na tvorbu zpevněného povrchu a zbytkových napětí. Faktem je, že se stoupající řeznou rychlostí v_c úměrně stoupá i teplota v okolí řezu. Zvětšování posuvu má vliv na růst plastické deformace v povrchové vrstvě a růst napětí. Při obrábění slitiny Ti-Al6-4V, zvýšení posuvu vyvolá růst plastické deformace, tlakových napětí a hloubku zpevněné povrchové vrstvy [44].

Geometrie břitu, především úhel čela má také významný vliv na tvorbu povrchového napětí „ σ “ který je patrný z grafu na obr. 24 (křivka 1-ložisková ocel 14109.3, křivka 2-slitina Ti-6Al-4V). Zmenšováním úhlu čela nástroje ve směru k negativním úhlům, roste plastická deformace nejen při obrábění titanových slitin. S tím je také spojen růst hustoty této vrstvy, což je doprovázeno zvýšeným nárůstem povrchového napětí [44].



Obr. 24 Vliv úhlu čela na povrchové napětí obrobeného povrchu Ti-6Al-4V [44].

Dalším faktem je, že s nárůstem opotřebení břitu je zvětšována třecí plocha hřbetu nástroje o přechodovou plochu. Dochází ke zvětšení r_e řezné hrany nástroje, materiál má tendenci se pěchovat místo odřezávat. Tím dochází k nárůstu plastické deformace a ke zvětšování oblasti zpevněné povrchové vrstvy a zbytkových napětí obrobené plochy. Na obr. 25 je zobrazen graf závislosti opotřebení hřbetu nástroje VB na průběhu napětí (křivka 2-slitina titanu Ti-6Al-4V, křivka 1-slitina titanu Ti-Al2-Mn1,5) [40].



Obr. 25 Vliv velikosti VB na zpevnění Ti-6Al-4V (křivka 2) [44].

3.5 Trendy zvyšující produktivitu a životnost nástroje při obrábění Ti-6Al-4V

Aby firma byla schopná efektivně odolávat konkurenčnímu prostředí, je nezbytné, aby maximálně usilovala o implementaci inovačních technologií, čímž si může zajistit konkurenční výhodu a to ve formě snížení nákladů, zvýšením produktivity a podobně.

3.5.2 Vysokotlaké chlazení Jetstream

Přednosti používání procesní kapaliny k odvádění tepla a mazání jsou všeobecně známé, přičemž je obvykle používán jednoduchý systém přívodu procesní kapaliny do prostoru obrábění. Aby byla zajištěna pokud možno co nejvyšší účinnost chlazení, musí být teplo odváděno z řezné zóny velmi rychle. Z toho důvodu je mnohem účinnější směrovaný vysokotlaký proud procesní kapaliny, který je přiváděn přesně do místa řezu v porovnání s konvenčním chlazením [47].

Se současným neustálým růstem požadavků na produktivitu při obrábění lze nalézt hned několik příkladů problémů. Jeden z významných se nachází u materiálů pro letecký průmysl, jako je například slitina titanu Ti-6Al-4V. Slitina má nízký modul pružnosti a nízkou tepelnou vodivost, což ji činí vhodným materiálem pro výrobu velmi pevných, tepelně odolných a lehkých částí proudových motorů. Je všeobecně známo, že obrábění této slitiny je drahé, jelikož vyžaduje nízké řezné rychlosti a životnost řezného nástroje je velmi nízká. Nedělené třísky mohou způsobovat ucpávání s následným selháním nástroje, případně i poškození drahých součástí [47].

Společnosti vyvíjející systémy přívodu procesní kapaliny k nástrojům, jako je například společnost Seco, pracují na optimalizaci systému zvýšením tlaku procesní kapaliny do místa řezu. Systémy jako je Jetstream Tooling (obr. 26), zahrnují strategicky rozmístěné otvory výstupu procesní kapaliny vyvrtané do otočných horních upínek (induktorů). Tlak procesní kapaliny ve spojitosti s malým průměrem otvorů umožňuje

dosáhnout přesně směřovaného proudu kapaliny s vysokou rychlostí. Proud pak snadno proniká do oblasti s nejvyšší koncentrací tepla hned za řeznou hranou a zajišťuje její intenzivní chlazení. Z výzkumu společnosti Seco vyplynulo, že nasměrování „klínu“ přívodu procesní kapaliny do těsné blízkosti řezné hrany je velmi účinné a efektivně tím přispívá k odlamování třísky [47].



Obr 26. Vysokotlaké chlazení Jetstream Tooling [48].

Při tlaku 20-40 bar lze se systémem Seco Jetstream Tooling dosáhnout významného zvýšení produktivity i zlepšení řízení utváření a odvodu třísek u většiny materiálů. Tlak 70 bar je pak dostatečný k odlamování třísek i z těch náročnějších přilnavých materiálů vytvářejících dlouhé třísky [47].

Testy provedené společností Seco s titanovým obrobkem při řezné rychlosti $40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlosti posuvu $0,25 \text{ mm}$ a hloubkou řezu 2 mm s přívodem procesní kapaliny prokázaly pětiminutovou dobu cyklu. Po aplikaci systému chlazení s vysokotlakým přívodem procesní kapaliny, bylo možno zvýšit řeznou rychlost na $80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Použitím vysokotlakého chlazení se podařilo zkrátit dobu cyklu o 50 % a prodloužit životnost nástroje o 100 % [47].

Výhody použití vysokotlakého chlazení mají největší přínos u soustružení, zapichování a upichování. Při těchto operacích je doba kontaktu mezi řeznou hranou a dílem často několik sekund nebo déle a tyto činnosti jsou označovány jako „nepřerušovaný řez“. Při nepřerušovaném řezu se v řezné zóně vytváří vysoká teplota, a je proto nutné přizpůsobit parametry řezu tak, aby se zabránilo rychlému opotřebení na hřbetě nástroje a plastické deformaci [47, 49].

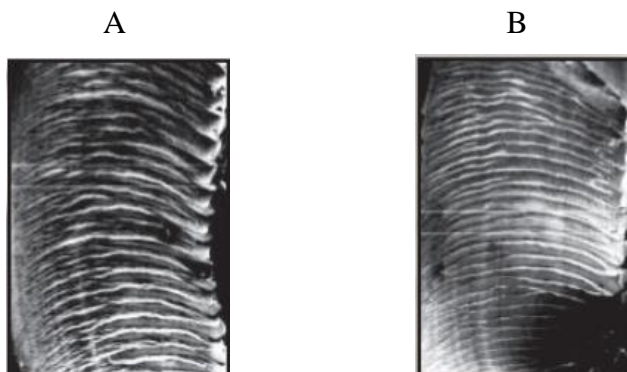
3.5.3 Efekt chlazení na třísku

Systém chlazení Jetstream Tooling účinně snižuje teplotu v místě řezu. Rychlé snížení teploty v tříске při jejím průchodu přes řeznou hranu vyvolává efekt tvrzení, který je prakticky stejný jako při rychlém zakalení kusu kovu. Tímto jevem dochází ke značnému růstu tvrdosti třísky, která je doprovázená i patřičným zvýšením křehkosti. Kombinace směřovaného proudu a tlaku procesní kapaliny proti tříске společně s její zvýšenou tvrdostí zajišťuje odlamování třísky na malé, snadno kontrolovatelné části (obr. 27) [49].



Obr 27. Dlouhá tříska vytvořená důsledkem přívodu procesní kapaliny s tradičním tlakem (v popředí). Krátké třísky s možností řízení (na pozadí), utvářené systémem Seco Jetstream Tooling, směřovaným vysokotlakým proudem procesní kapaliny [48].

Na (obr. 28 A) je zvětšená tříska, na které je možno vidět nerovnoměrnou velikost trhlin po celé tloušťce. Tento fakt podporuje spíše kroucení a hromadění třísek, než aby třísky měly tendenci se lámat. Naopak na (obr. 28 B) jsou dlouhé souměrné hladké trhliny, které jsou rozšířené po celé tloušťce třísky. V kombinaci s efektem zpevňování (způsobeno rapidní redukcí teploty), trhliny umožňují snadnou lámavost v celé tloušťce a podporují tak vznik menších třísek [49].



Obr 28. Trhliny na tříске při konvenčním chlazení (A), trhliny na tříске při vysokotlakém chlazení Jetstream Tooling (B) [49].

Tab. 9 Porovnání konvenčního a vysokotlakého chlazení Jetstream při obrábění Ti-6Al-4V [49].

Součást: Náboj kola		
Materiál: Ti-6Al-4V		
Operace: Vnitřní hrubování		
Břítová destička: SNMG643-MR4, 883		
Typ chlazení:	Konvenční chlazení	Jetstream Tooling (80bar)
Řezné parametry:	$v_c = 35$ m/min	$v_c = 80$ m/min
	$f = 0,35$ mm	$f = 0,35$ mm
	$a_p = 8$ mm	$a_p = 8$ mm

Implementací vysokotlakého chlazení se dosáhlo 50% snížení času výrobního cyklu (tab. 9). Další pozitivní vliv mělo chlazení Jetstream na snížení vrubového opotřebení, opotřebení na hřbetu a tvorbu kratších a lámavých třísek.

3.5.4 Kryogenní chlazení

Kryogenní chlazení je technologickým trendem, který se využívá pro obrábění těžko obrobitelných materiálů jako jsou slitiny titanu, inconelu a dalších. Způsobů, jak dosáhnout velmi nízkých teplot média pro chlazení nástroje je vícero. Zpravidla se jako chladicí médium používá tekutý dusík LN_2 , případně CO_2 . Jednou z metod aplikace je vstřikování tekutého dusíku mikrotřyskou na čelo řezného nástroje před utvářeč třísky a druhou mikrotřyskou přímo na ostří nástroje. Experimentálně bylo zjištěno, že nejefektivnějším přístupem je současné chlazení obrobku i nástroje. Použití kryogenického chlazení při obrábění přímo ovlivňuje vlastnosti materiálu obrobku, teploty při obrábění, opotřebení a životnost nástroje, dosaženou drsnost a přesnost, součinitel tření mezi nástrojem a obrobkem a velikost řezné síly [50, 51].

Použitím kapalného dusíku LN_2 s teplotou až -196 °C je nutné zajistit speciální systém distribuce dusíku (izolované nádoby pro skladování, vakuem izolované hadice, odpovídajícím způsobem dimenzované rozvody uvnitř stroje i nástrojového systému). Méně nákladným způsobem kryogenního chlazení je chlazení paprskem kapalného CO_2 s teplotou od -78 °C. Bezkonkurenční výhody nabízí tento způsob chlazení obzvláště při obrábění slitin titanu a niklu nebo duplexních ocelí, kde vysoké termické zatížení bříty vede k jeho rychlému opotřebení. Kryogenní chlazení umožňuje u těchto materiálů významné zvýšení řezných parametrů a životnosti [52].

3.5.5 Kryogenní chladicí systém CO_2

Chladicí systém CO_2 byl uveden na trh firmou Starrag pro své obráběcí stroje (obr. 30). Úkolem chlazení je zvýšení produktivity výroby u vysoce pevných materiálů o nejméně 75 %. Mimořádné možnosti chlazení CO_2 dokumentuje Starrag při frézování turbínových lopatek na obráběcím centru LX 051. Obrábění nástroji Cryo-tec byl zaznamenán úběr na úrovni 64 % (přesně 278 cm^3) materiálu slitinové nástrojové oceli X12CrNiWTiB16-13/730 v porovnání s konvenčním procesem. Mimořádnou úsporu představuje doba úběru materiálu 2,7 min proti 4,5 min původního obrábění za sucha.

Použitím nástrojů Cryo-tec (obr.29), se při kryogenním chlazení sníží teplota ze 160 na 40 °C. Uvedeným systémem, kdy chladicí médium je vedeno vřetenem, se výrazně sníží opotřebení hřbetu nástroje. To umožní zvýšit řeznou rychlost z 320 m.min⁻¹ na 400 m.min⁻¹ a velikost posuvu na zub z 0,4 mm na 0,55 mm. Experimentem se prokázalo, že kombinované chlazení CO₂-vzduch zajišťuje zlepšení rychlosti odvodu třísek z místa řezu o cca 70 %, což znamená vysoký nárůst produktivity obrábění [53].



Obr. 29 Model nástroje Cryo•tec™ pro kryogenní obrábění [54].



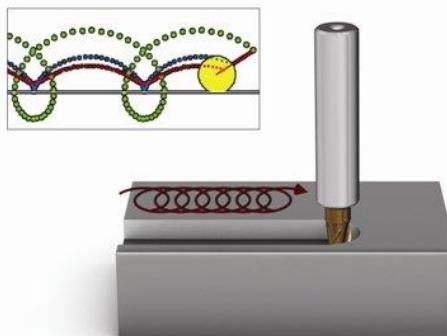
Obr. 30 Kryogenní chlazení připravené k vrtání: frézovací vřeteno Starrag vybavené CO₂ chlazením při vrtání [55].

3.5.6 Trochoidní frézování

V dnešní době se musí řada firem vypořádat s úkoly obrábění těžkoobrobitelných materiálů, mezi něž patří také slitiny titanu pro letecký průmysl. Řada CNC řídicích systémů, mezi které spadá i Heidenhain poslední generace TNC 640, nabízejí funkci trochoidního frézování, kdy se nástroj pohybuje po kombinované trajektorii. Tato funkce sleduje naprogramovanou křivku a současně vykonává podél své dráhy kruhové pohyby, díky nimž je v záběru vždy jen definovaná část nástroje (obr. 31). Ve srovnání s řádkovým obráběním umožňuje trochoidní frézování hloubku řezu až do 2D nástroje. Stejně jako titanové slitiny lze stejným způsobem obrábět veškeré těžko obrobitelné materiály, jako žárupevné slitiny do leteckých motorů, materiály třídy 19 nebo nerezové oceli [56].

Jednou z předností je možnost zhotovení drážky větší šířky než je vlastní průměr nástroje. Z toho vyplývá, že různé šířky drážek lze vyrobit efektivně pomocí jediného nástroje. Jelikož se při metodě využívá malé radiální hloubky řezu, lze použít nástroj s malou zubovou roztečí, tedy v porovnání s běžnými aplikacemi je zvýšena rychlost posuvu i řezná rychlost. Testy prokázaly, že trochoidní metoda může být rychlejší než běžné drážkování, jelikož je možné použít daleko vyšší řezné parametry [57].

Frézování mělkých či hlubších kapes v titanu je vždy problém. Po delší době nástroje v záběru se generuje vysoká teplota. Řezné tlaky pulzují tak, jak břit vniká a opouští řeznou zónu, což může vést k vibracím. Velký úhel opásání nástroje a větší poměr hloubky záběru a průměru nástroje také vede k problémům s přehříváním nástroje a ke špatnému odvodu třísek. Důsledkem je pak nutnost snížení řezných parametrů, což je doprovázeno poklesem produktivity [58].



Obr. 31 Trochoida je geometrická křivka, která je vytvořena bodem na kruhu, jenž rotuje a jehož střed se zároveň pohybuje [58].

Jednou ze strategií, jak docílit uspokojivé efektivity obrábění titanu, je trochoidní frézování. Použitím trochoidním frézováním drážek monolitní karbidovou frézou či čelní vřetovovou frézou s VBD lze většinu negativních vlivů eliminovat. Metoda spočívá v programované kruhové dráze nástroje s přísuvem vpřed do záběru s každým cyklem. Průměr nástroje je menší než nominální šířka drážky. Jelikož je vždy pouze malá část nástroje v záběru, vzniká dostatek místa pro odchod třísek ze záběru a dochází i k poklesu tepelného namáhání nástroje. Pokud je to možné, doporučuje se používat sousledné frézování [58].

3.5.7 Nástroje pro trochoidní frézování

Pro způsob trochoidního frézování firma Iscar doporučuje použít stopkové frézy Chatterfree nebo nástroje řady Helido či Helimill s výměnnými destičkami. Chatterfree jakož to monolitní karbidové frézy s variabilní zubovou roztečí jsou s ohledem na svoji konstrukci vhodným nástrojem pro zhotovení kapes a drážek nejen trochoidním způsobem. Nástroje disponují vysokým stupněm odolnosti vůči vibracím a životností. Jakost karbidu IC900 s povlakem PVD TiAlN zaručuje výbornou kombinaci mechanických vlastností pro zmíněný způsob frézování [58].

Zvýšení produktivity a snížení nákladů trochoidním frézováním vyplývá z příkladu použití nástroje Chatterfree v praxi. Řezné parametry a výsledky jsou uvedeny v tab. 10. Praxe potvrzuje, že při obrábění drážky do plna je třeba posuv snížit na 20 % oproti posuvu obvyklému při bočním frézování. Trochoidní frézování drážky umožní použít posuv ve výši až 80 % hodnoty posuvu používaného při běžném bočním frézování [58].

Tab. 10 Porovnání standardního a trochoidního frézování drážky v titanové slitině [58].

	Trochoidní frézování	Konvenční frézování
Materiál obrobku	Ti-6Al-4V (třída 5), žíháho	Ti-6Al-4V (třída 5), žíháno
Nástroj	Iscar čelní stopková fréza: ECH160B32-6C16	Iscar čelní stopková fréza: EFS-B44 16-34W16-92
Třída karbidu	IC900	IC900
Průměr nástroje [mm]	16	16
V_c [m/min]	115	45
F_z [mm/zub]	0,12	0,04
a_p [mm]	22	12
a_e [mm]	1-1,5	12
Chlazení	Emulze	Emulze
Čas výroby [min]	33	55
Životnost nástroje [ks]	4	4


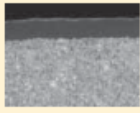

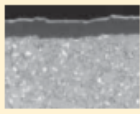

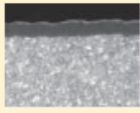




3.6 Doporučené třídy VBD vybraných výrobců pro soustružení Ti-6Al-4V

Třídy jednotlivých řezných nástrojů jsou navrženy výrobcí tak, aby bylo zajištěno co možno nejvyšší efektivity obrábění daného materiálu. V (tab. 11, 13) se nachází doporučené třídy řezných nástrojů pro soustružení titanové slitiny Ti-6Al-4V.

Tab. 11 Doporučené řezné podmínky pro TS 2000/ TS 2500 (Seco) [61].

Soustružení Ti-6Al-4V				
Typ Povlaku	Třída	Šířka záběru ostří a_p [mm]	Posuv f [mm]	Doporučená řezná rychlost v_c [m/min]
PVD TiAlN	TS2000	0,25-3	0,08-0,3	70-50
PVD TiAlN	TS2500	0,8-3	0,15-0,35	40-30



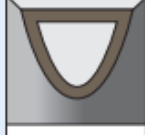
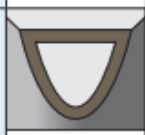

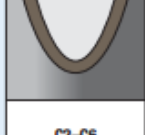
Tab. 12 Třídy pro soustružení titanové slitiny Ti-6Al-4V (Seco) [61].

TS2000 		<p>Tvrďá jemnozrná třída s vysokou odolností vůči opotřebení, určená pro dokončování vysoce legovaných slitin, titanových slitin a čtených nerezových ocelí.</p> <p>(Ti,Al)N + TiN</p>
TS2500 		<p>Třída s relativně tvrdou mikrostrukturou pro obrábění vysoce legovaných slitin titanu v hrubovacích aplikacích, svým provedením jsou také vhodné pro širokou řadu materiálů jako jsou nerezové oceli.</p> <p>(Ti,Al)N + TiN</p>
CP200 		<p>Tvrďá mikrostruktura, určená hlavně pro obrábění na čisto u vysoce legovaných slitin a titanu. Dobrý výkon podává i u nerezových ocelí.</p> <p>(Ti, Al) N + TiN</p>
883 		<p>Relativně tvrdá a stále ještě houževnatá, nepovlakovaná jemnozrná třída pro obrábění titanu v hrubovacích aplikacích a také vhodná pro vysoce legované slitiny.</p>
890 		<p>Nepovlakovaná, jemnozrná třída s velmi vysokou tvrdostí dobrou houževnatostí, určená pro vysoce legované a titanové slitiny, může být také použita v dalších materiálech.</p>

Tab. 13 Doporučené řezné podmínky pro KC 5010/ KC 5510 (Kennametal) [62].

Soustružení Ti-6Al-4V					
Typ Povlaku	Třída	Šířka záběru ostří a_p [mm]	Posuv na ot f [mm]	Doporučená řezná rychlost v_c [m/min]	Trvanlivost nástroje [min]
PVD AlTiN	KC 5010	2,5	0,25	70 (60-90)	8
PVD AlTiN	KC 5510	0,3	0,13	140 (137-168)	25

Tab. 14 Třídy pro soustružení titanové slitiny Ti-6Al-4V (Kennametal) [62].

		odolnost proti opotřebení ← → Houževnatost										
Povlak	Vlastnosti sorty		05	10	15	20	25	30	35	40	45	
K313  C3–C4	Složení: Tvrdá, nelegovaná jemnozrná sorta WC/Co s nízkým obsahem pojiva. Aplikace: Vynikající odolnost proti opotřebení a vysokou pevnost při obrábění titanu, litin, austenitických nerezových ocelí, nekovových materiálů, žáruvzdorných materiálů a neželezných kovů. Vynikající odolnost proti teplotní deformaci a vrubovému opotřebení. Struktura zrn je kontrolována z hlediska minimálního výskytu mezer a trhlin, které by mohly snížit dlouhou a spolehlivou funkci.	M										
		K										
		N										
		S										
KCU25  C2, C6	Složení: Vylepšená sorta z jemnozrného nelegovaného substrátu s PVD povlakem AlTiN. Nový vylepšený povlak zlepšuje pevnost řezné hrany v širokém rozsahu řezných rychlostí a posuvů. Aplikace: Sorta KCU25 je vhodná pro všeobecné obrábění většiny ocelí, nerezových ocelí, litin a neželezných materiálů a těžce obrobitelných materiálů díky vyšší pevnosti řezné hrany a možnosti použití za vyšších řezných rychlostí a posuvů.	P										
		M										
		K										
		N										
		S										
KC5010  C3–C4	Složení: Vylepšený PVD povlak TiAlN na velmi pevném nelegovaném karbidovém substrátu. Nový vylepšený povlak umožňuje zvýšení řezných rychlostí a posuvů o 50–100%. Aplikace: Sorta KC5010 je vhodná pro dokončování nebo všeobecné soustružení většiny materiálů při vyšších řezných rychlostech. Obrábění většiny ocelí, nerezových ocelí, litin a neželezných materiálů a těžce obrobitelných materiálů při stabilních podmínkách obrábění. Dobré výsledky i při obrábění tvrdých ocelí nebo materiálů s krátkou tržnou.	P										
		M										
		K										
		N										
		S										
KC5025  C2, C6	Složení: Sorta s pevným ultra jemným nelegovaným substrátem s PVD povlakem TiAlN. Aplikace: Pro obecné obrábění ocelí, nerezových ocelí, žáruvzdorných materiálů, titanu a neželezných kovů. Nejlepších výsledků dosahuje při nízkých až středních řezných rychlostech a je schopna zvládnout přerušované řezy a vysoké posuvy.	P										
		M										
		K										
		N										
		S										
KC5510  C3–C4	Složení: Jemnozrná karbidová sorta s PVD povlakem TiAlN. Aplikace: Sorta KC5510 je speciálně určená pro produktivní obrábění žáruvzdorných slitin. Jemnozrný karbidový substrát s 6% kobaltu má vynikající pevnost a odolnost proti deformaci a vylepšený PVD povlak umožňuje použití při dvojnásobných řezných rychlostech oproti konvenčním PVD povlakům.	P										
		M										
		K										
		N										
		S										
KC5525  C2–C6	Složení: Jemnozrná karbidová sorta s vysokým obsahem kobaltu a PVD povlakem TiAlN. Aplikace: Sorta KC5525 využívá stejný PVD povlak jako sorta KC5510 na jemnozrném karbidovém substrátu s 10% obsahem kobaltu. Vyšší obsah kobaltu zajišťuje vyšší bezpečnost při přerušovaných řezech a jemnozrný substrát WC zajišťuje tvrdost a odolnost proti deformaci při vysokých řezných rychlostech. Středně až těžce přerušované řezy při obrábění žáruvzdorných slitin.	P										
		M										
		K										
		N										
		S										

4 PŮVODNÍ A INOVOVANÁ TECHNOLOGIE VÝROBY SOUČÁSTI

Ve čtvrté kapitole je popsán prvotní technologický postup obráběcích operací součástí. Ke každé obráběcí operaci je přiřazen strojní a seřizovací čas. Dále je kapitola věnována převodu dílce na nové progresivní soustružnicko-frézovací CNC centrum DMC 80 U duoBLOCK. Úvodem je stručně popsáno výběrové řízení na stroj a parametry podle kterých byl následně stroj vybrán. Součástí kapitoly je nově navržený technologický postup s důrazem na sloučení obráběcích operací. Mimo jiné je zde popsán způsob upnutí součásti a nástroje, které byly aplikovány v jednotlivých operacích. Ke každé obráběcí operaci je přiřazen strojní a seřizovací čas, které jsou později porovnány a zhodnoceny v následující kapitole.

4.1 Původní technologický postup obráběcích operací

Součástí kapitoly je technologický postup obráběcích operací, který je součástí celkového technologického postupu. Součástí jsou i výrobní časy (přípravné/strojní), které jsou přiřazené k jednotlivým operacím v tab. 15. Sled jednotlivých obráběcích operací se nachází v příloze 10-15.

Tab. 15 Původní technologický postup obráběcích operací [65].

Výrobní proces			Součást: Podpora ventilátoru	Výrobní čas [min]	
			Materiál: Ti-6Al-4V		
Op.	Stroj	Typ operace	Popis	Přípravný	Strojní
2	MOTCH 125 VNC	Soustružení	Zarovnání ploch-tvorba základen	55	142
3	ROMI HDL 33-20	Soustružení	Zarovnání ploch-tvorba základen	30	36
4	Lancer 1250	Frézování-vrtání	Frézování čela, vrtání středící díry	59	118
6	MOTCH 125 VNC	Soustružení	Soustružení čela a průměrů str. A	45	179
7	MOTCH 125 VNC	Soustružení	Soustružení čela a průměrů str. B	45	115
8	MITSUI SEIKI HS5A	Frézování-vrtání	Frézování drážek a vrtání děr	55	166
10	Elenix Drill CT 300	Vyjiskřování-EDM	Vyjiskřování díry	10	20
11	Elenix Drill CT 300	Vyjiskřování-EDM	Vyjiskřování díry	10	24
12	Avey DrillPress	Vrtání	Vrtání v dutině	15	70
20	SI6/1 Ax 500	Broušení	Broušení čela a vnitřního průměru	15	68
			Celkový čas obráběcích operací	339	938

Z technologického postupu je zřejmé, že celkový čas obráběcích operací zastává více jak 70 % celkového výrobního času součásti.

4.2 Výběrové řízení na výrobní stroj

Výběr soustružnicko-frézovacího CNC centra vyplynul ze specifických požadavků firmy Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.

Mezi primární požadavky spadaly:

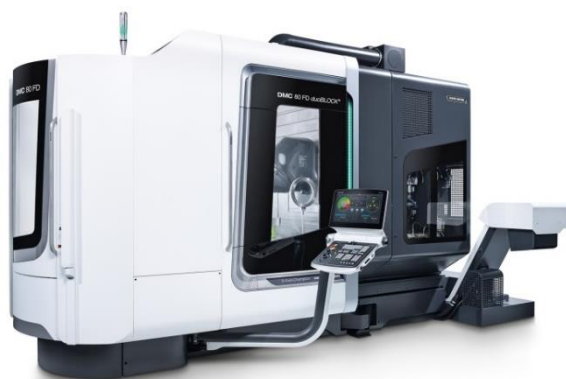
- vysokotlaké chlazení Jetstream,
- řídicí systém Haidenhein,
- aplikace technologií soustružení a frézování,
- dvoupaletové integrované zařízení.

Součástí výběrového řízení se zúčastnily tři firmy. Nakonec bylo pořízeno CNC soustružnicko-frézovací centrum DMC 80 FD duoBLOCK.

4.3 CNC soustružnicko-frézovací centrum DMC 80 FD duoBLOCK

Společnost DMG Mori svými univerzálními soustružnicko-frézovacími centry řady duoBlock ovlivnila zásadním způsobem vývoj efektivního obrábění. Soustružnicko-frézovací stůl s krouticím momentem 2 050 Nm a 800 min^{-1} umožňuje velké obráběcí výkony (příloha 3). Rovněž vysoký podíl modelů s výměníkem palet přispěl ke zvýšení stupně automatizace třískového obrábění. Tento trend následuje i čtvrtá generace obráběcích center DMC 80 FD duoBlock. Nově vyvinutá frézovací hlava s osou B nabízí rozšířený rozsah naklápění 250° (-70° - 180°), zatímco zvětšené uložení osy zvyšuje tuhost skříně frézovací hlavy o 20 %. Celková tuhost stroje DMC 80 FD duoBlock byla zvýšena o 30 % i při menších nárocích na prostor. Nový progresivní kotoučový zásobník nástrojů je jeden z nejkompaktnějších na trhu, jímž se zaručilo zúžení stroje až o 41 % vůči jeho předchůdci. Ke zvýšení produktivity přispívá nový zásobník nejkratším časem výměny 5,6 sekundy při maximální kapacitě až 363 nástrojů a možností přípravy paralelně k hlavnímu času [67].

CNC centrum DMC 80 FD duoBLOCK (obr. 32, 33) jako jeden z prvních strojů se může pyšnit plně chlazeným pohonem posuvů. Komplexní chladicí zařízení v kombinaci s tvrzeným ložem stroje zajišťuje až o 30% vyšší přesnost výroby komponentů (příloha 4). Stroj disponuje také vysokou tuhostí díky zvětšení stojanu, rozšíření supportu a vřetena PowerMaster 1000, což potvrzuje schopnost obrábění stroje při maximálním krouticím momentu 1000 Nm (příloha 3) [67].



Obr. 32 DMC 80 FD duoBlock [68].



Obr. 33 DMC 80 FD duoBlock pracovní prostor [69].

4.4 Řídicí systém HEIDENHAIN TNC 640

Řídicí systém (ŘS) TNC 640 je jeden z prvních univerzálních systémů vhodných jak pro operace frézování, tak operace soustružení. Jakož to bývá zvykem u většiny řídicích systémů Heidenhain, tvorba NC programu probíhá pomocí dialogu podporované množstvím technologických cyklů. Jedná se o ucelený koncept, který je schopný provádět jak základní, tak výkonově složitě operace [70].

Některá pozitiva řídicího systému HEIDENHAIN TNC 640 [67].

- podpora 3D simulací,
- grafické programování,
- kontrola kolizí (DCM),
- výkonný dvou-jádrový procesor (Intel i7-3),
- průvodce pro zlepšování povrchů a zrychlení výroby ADP (Advanced Dynamic Prediction),
- adaptivní kontrola posuvu AFC.

4.5 Inovovaný technologický postup výroby s důrazem na obráběcí operace

Součástí kapitoly je inovovaný technologický postup výroby součásti, jejímž cílem bylo snížit výrobní čas a snížit počet upnutí součásti *Podpora ventilátoru* při obráběcích operacích. V inovovaném technologickém postupu (tab. 16) je především zřejmé významné snížení strojního/přípravného času a snížení počtu upnutí při obráběcích operacích.

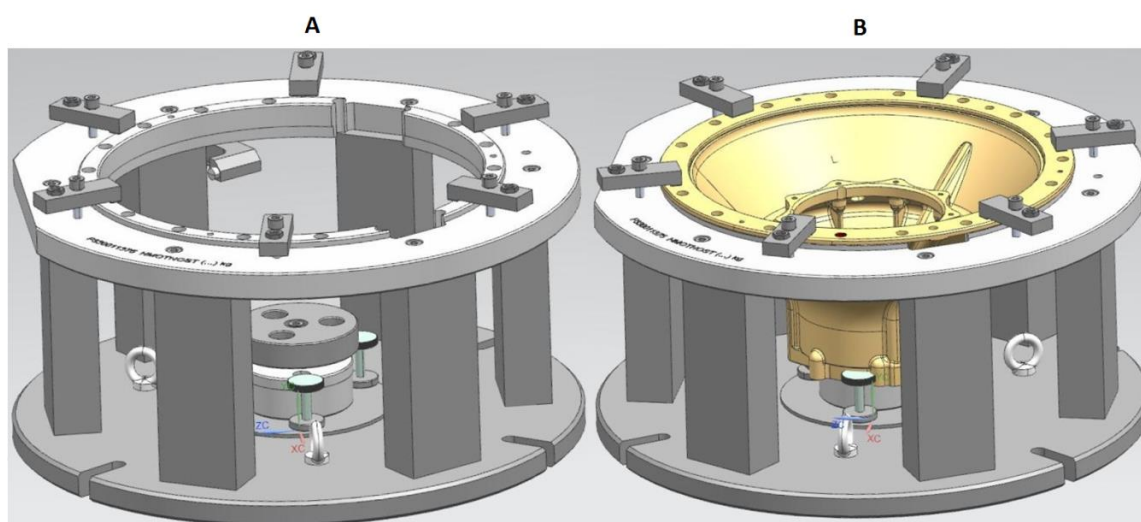
Tab. 16 Inovovaný technologický postup součásti *Podpora ventilátoru* [65].

Výrobní proces			Součást: Podpora ventilátoru	Výrobní čas [min]	
			Materiál: Ti-6Al-4V		
Op.	Stroj	Typ operace	Popis	Přípravný	Strojní
2	MOTCH 125 VNC	Soustružení	Zarovnání ploch-tvorba základen	55	142
3	ROMI HDL 33-20	Soustružení	Zarovnání ploch-tvorba základen	30	36
4	Lancer 1250	Frézování-vrtání	Frézování čela, vrtání středící díry	59	118
6	DMC 80 FD duoBLOCK	Soustružení	Soustružení čela a průměrů str. A	45	134
		Frézování-vrtání	Frézování drážek a vrtání děr	0	90
		Vrtání	Vrtání v dutině	0	10
7	DMC 80 FD duoBLOCK	Soustružení	Soustružení čela a průměrů str. B	45	86
		Frézování-vrtání	Frézování drážek a vrtání děr	0	45
		Vrtání	Vrtání díry	0	4
10	Elenix Drill CT 300	Vyjiskřování-EDM	Vyjiskřování díry	10	24
18	SI6/1 Ax 500	Broušení	Broušení čela a vnitřního průměru	15	68
			Celkový čas obráběcích operací	259	757

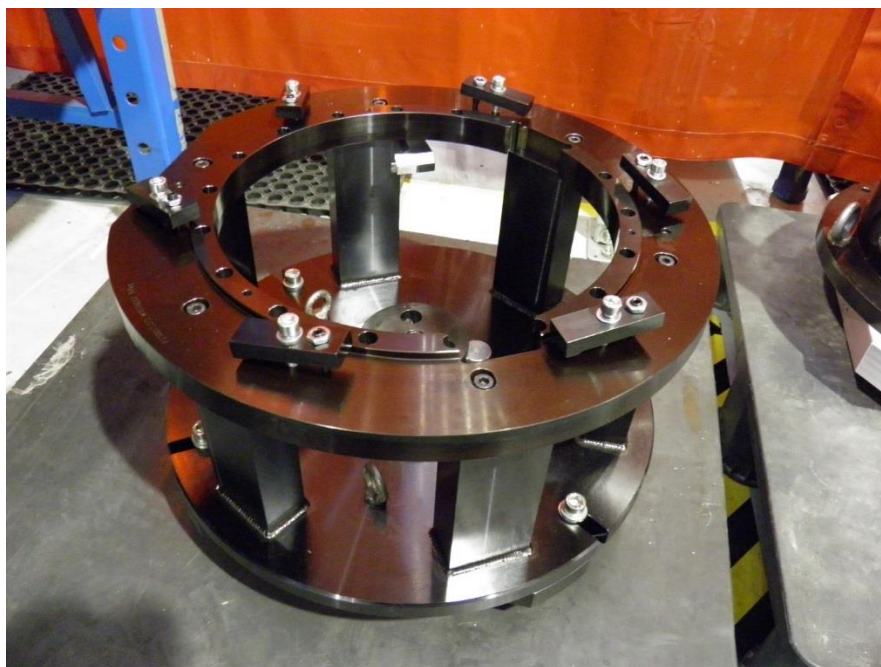
4.5.1 Operace 6 - sloučená operace soustružení/vrtání/frézování

Výrobní stroj: DMC 80 FD duoBLOCK,

Způsob upnutí součásti: speciální polohovací přípravek k zajištění polohy.



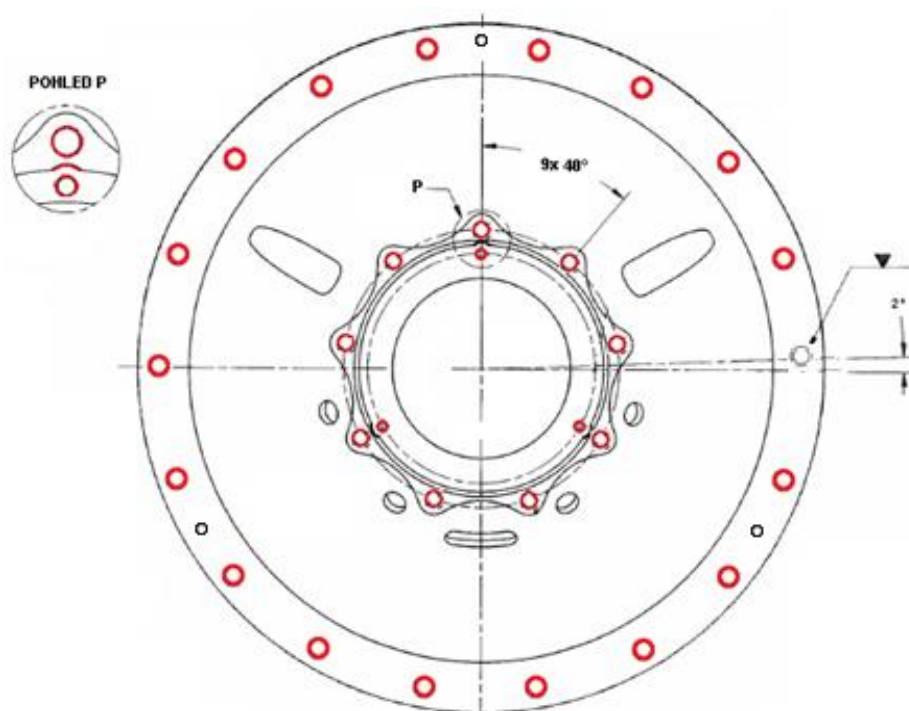
Obr. 34 Nově navržený přípravek pro operaci 6.



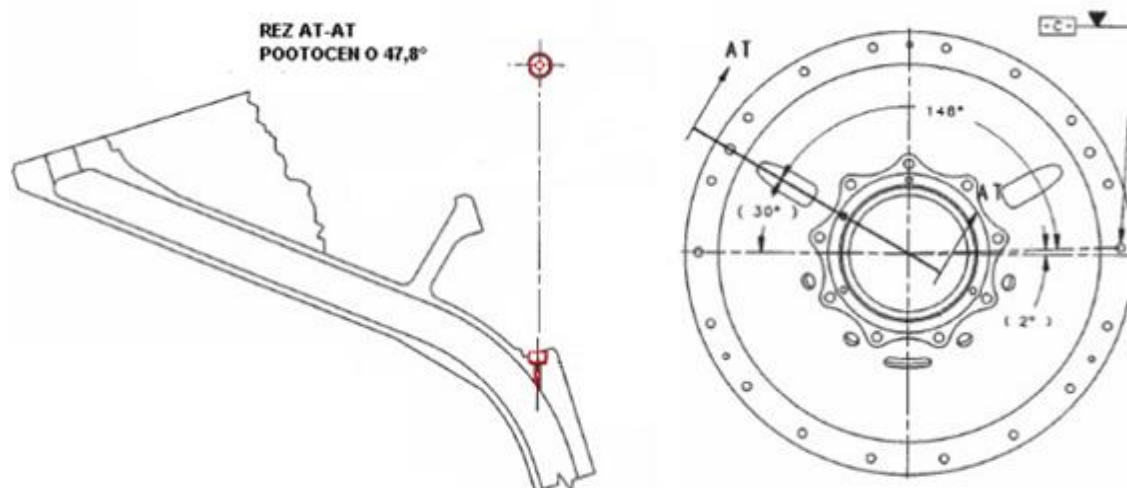
Obr. 35 Nově navržený přípravek pro operaci 6.

Tab. 17 Použité nástroje v operaci 6 [66].

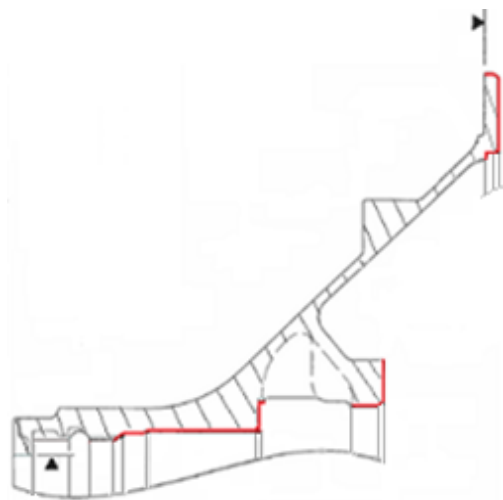
Rotační nástroje	Katalogové číslo	Držák	Katalogové číslo
Vrták šroubovítý s vnitřním chlazením D8,5	B210A08500HP KCM15	Tepelný upínač 10/L85	HSK63AHPVTT10085M
Vrták šroubovítý s vnitřním chlazením D5,1	ANAJ-19444.0	Tepelný upínač 10/L160	HSK63AHPVTT10160M
Vrták šroubovítý s vnitřním chlazením D10,4	B210A10400HP KCM15	Tepelný upínač 12/L90	HSK63AHPVTT12090M
Vrták šroubovítý D4,57	R-9265-0	Tepelný upínač 12/L160	HSK63AHPVTT12160M
Vrták šroubovítý D1,07	R-9266-1	Tepelný upínač 12/L160	HSK63AHPVTT12160M
Středicí vrták 90° D8	R-2399-0	CentroP 2-16 ER25 HSK-A63 - 130/40 (kleštinový)	84722619
Středicí vrták 90° D10	B505Z10000 K10	CentroP 1-10 ER16 HSK-A63 - 160/30 (kleštinový)	84722611
Závitník 3/8-16 UNC 2B	T662NC03750-16RH5-4	Synchro plus (kleštinový)	HSK63ASYTER20095M
Závitník EG 10-32 UNF	SA390-3 EG UNF 10-32	Tepelný upínač 10/L160	HSK63AHPVTT10160M
Fréza TK 2-břit D4,57	R-9264-0	Tepelný upínač 12/L160	HSK63AHPVTT12160M
Fréza TK 4-břit D10	48556	Kleštinový upínač HSK-A63 ER32	A63.020.32
VBD	Katalogové číslo	Soustružnický nůž	Katalogové číslo
WNMG	WNMG 0804044 TN 6025	Nůž vnitřní	C5-PWLNR -27140-08
	WNMG 0804084 TN 6025	Nůž vnější	C5-PWLNL -35060-08
	WNMG 0804044 TN 6025	Nůž vnější	C5-PWLNL -35060-08



Obr. 36 Vrtání a řezání závitů, frézování rádiusu [66].



Obr. 37 Vrtání díry [66].

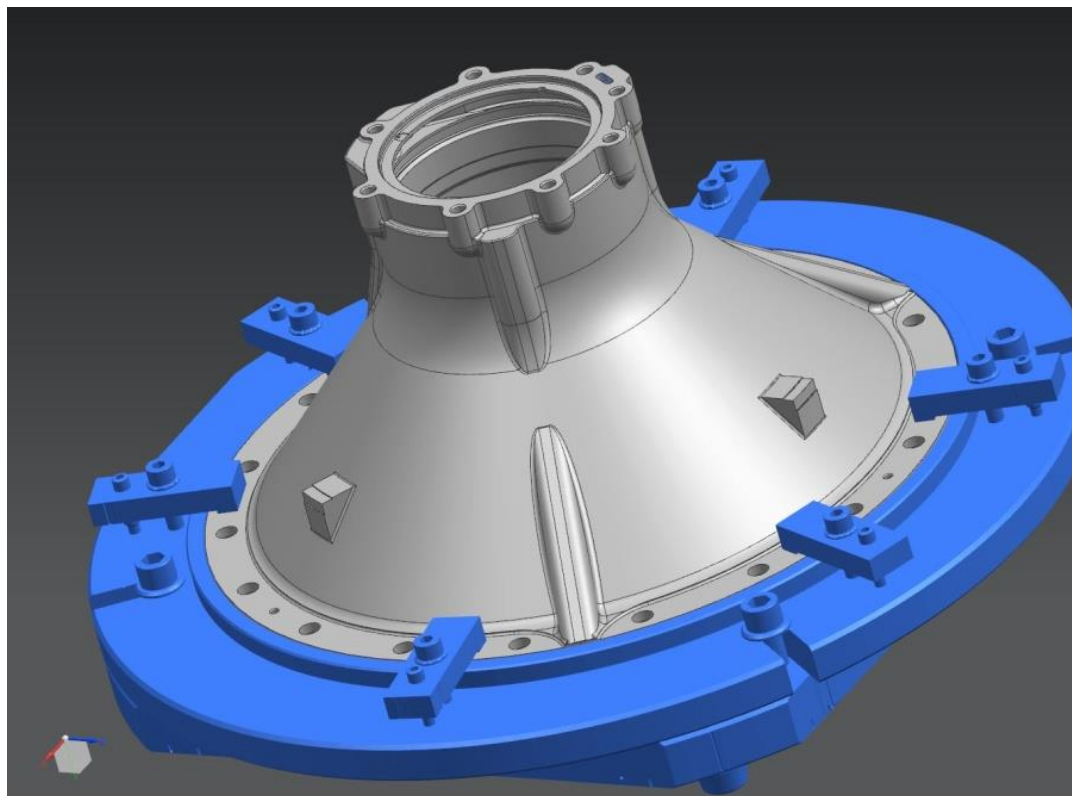


Obr. 38 Soustružení čel, vnitřních a vnějších průměrů [66].

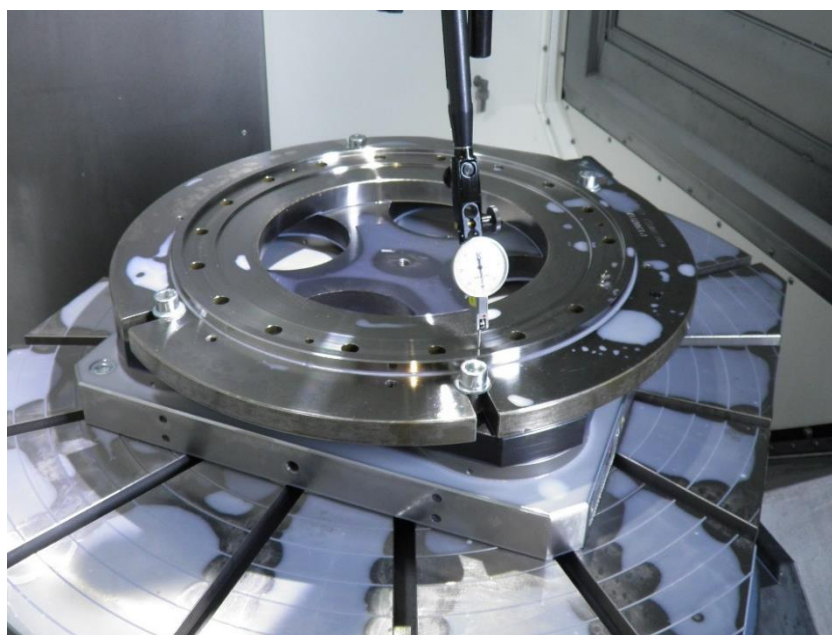
4.5.2 Operace 7 - sloučená operace soustružení/vrtání/frézování

Výrobní stroj: DMC 80 FD duoBLOCK

Způsob upnutí součásti: speciální polohovací přípravek k zajištění polohy



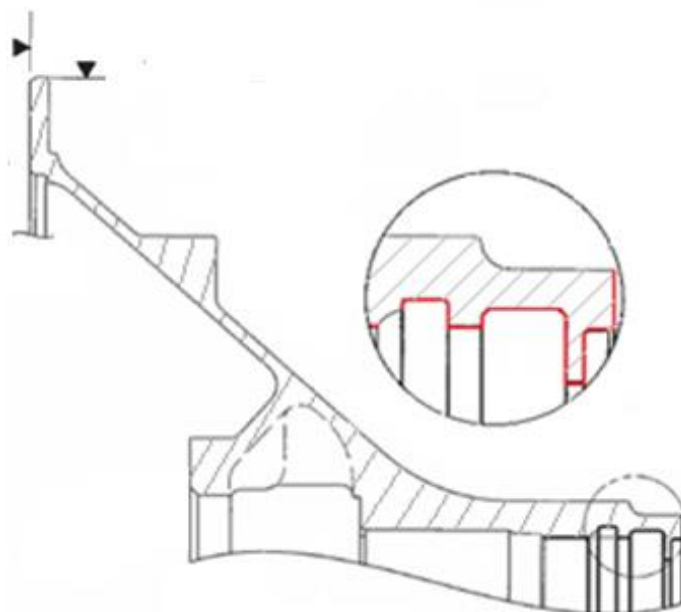
Obr. 39 Nově navržený přípravek pro operaci 7.



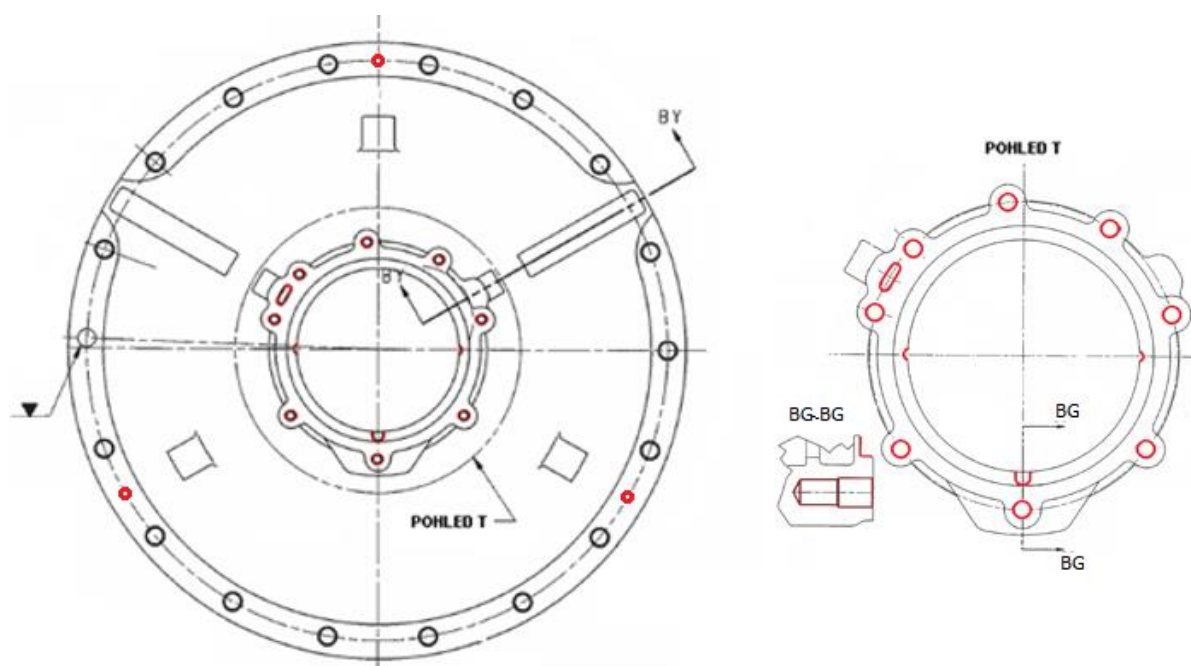
Obr. 40 Nově navržený přípravek pro operaci 7.

Tab. 18 Použité nástroje v operaci 7 [66].

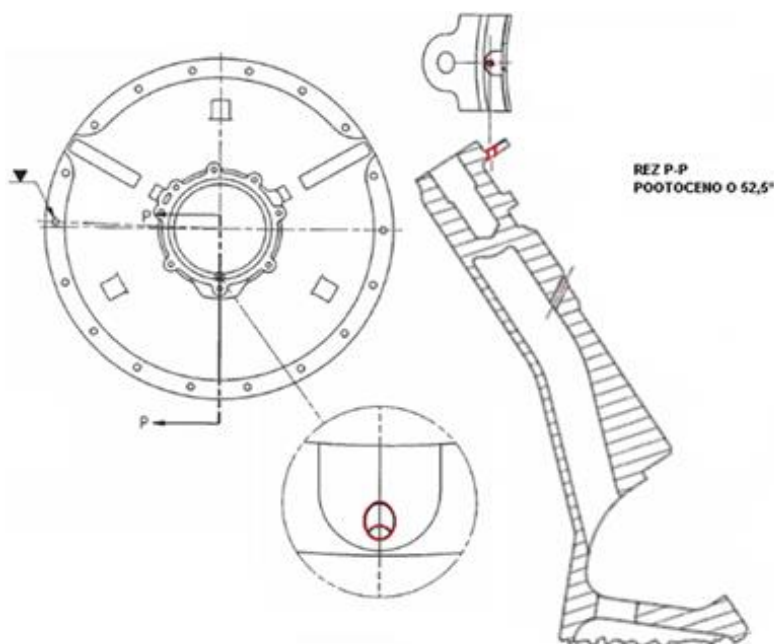
Nástroje	Katalogové číslo	Držák/Soustruž. nůž	Katalogové číslo
Středící vrták 90° D10	B505Z10000 K10	Tepelný upínač 20/L160	HSK63AHPVTT20160M
Vrták šroubovitý s vnitřním chlazením D 4,1	ANAJ-039680-D04100/3D	Tepelný upínač 20/L160	HSK63AHPVTT20160M
Závítník 10-32 UNF 3B	T662NF 10-32RH3-A KSS20	Sychro plus	HSK63ASYTER32108M
Středící vrták 90° D10	B505Z10000 K10	CentroP 1-10 ER16 HSK-A63 - 160/30	84722611
Závítník 5/16-18 UNC 2B	TL351 VS-3 5/16-18 UNC 2B	Kleštinový upínač HSK-A63 ER16	HSK63AER16160M
Vrták šroubovitý D1,6	R-8653-0	Tepelný upínač	Eroglu A63.25.03.160
Vrták šroubovitý s vnitřním chlazením D3,9	ANAJ-039670-D03900/3D	Tepelný upínač 6/L80	HSK63AHPVTT06080M
Fréza stopková 2-břit D1,6	R-8654-0	Tepelný upínač	Eroglu A63.25.03.160
Fréza stopková 5-břit D4	UCDE0400A5ARA	Tepelný upínač 6/L80	HSK63AHPVTT06080M
Vrták šroubovitý s vnitřním chlazením D6,9	B210A06900HP KCM15	Tepelný upínač 8/L120	HSK63AHPVTT08120M
VBD-DGNP	150404K 150404K	Nůž vnitřní HSK 63	KM50NCT10820-1
VBD-NGD4189LK	NGD4189LK KC730 1114392	Nůž zapichovací KM50 NCT 10923	NCT 10923
VBD-WNMG	WNMG 0804044 TN 6025	Nůž vnitřní HSK63	C5-MWLNL-35060-08
VBD-WNMG	WNMG 080408-4 TN 6025	Nůž vnější HSK63	C5-PWLNL -35060-08
VBD-WNMG	WNMG 0804044 TN 6025	Nůž vnitřní HSK63	C5-PWLNL -35060-08



Obr. 41 Soustružení vnitřních průměrů a zapichovací operace [66].



Obr. 42 Operace 8 vrtání, závitování a frézování [66].



Obr. 43 Řez P-P, upnutí dílce za základny H a J s následným vrtáním díry [66].

4.6 Statická analýza

Jelikož použitím nového přípravku jsou dosedací a upínací plochy jiné než v předchozí výrobě, statickou analýzou byla prověřena stabilita geometrie v průběhu obráběcí operace.

Úkolem statické analýzy je zjistit velikost napětí, směr deformace a zdali geometrie dílce vydrží zatížení, které na ní působí soustružnický nůž při upnutí v operaci 7.

V první řadě bylo nutné zjistit na základě velikosti řezných podmínek, kde a v jaké operaci bude působit nejvyšší řezná síla na upnutý kus. Na základně vysokých hodnot $a_p=4,8$ mm a $f=0,07$ mm vyplynulo, že nejvyšší řezná síla bude působit při zapichování vnitřního průměru.

Parametry potřebné k výpočtu řezné síly [71]:

Materiál: Ti-6Al-4V,

Měrná řezná síla $kc_{1.1}=1440$ N/mm²,

Nárůst měrné řezné síly v závislosti na tloušťce třísky $mc=0.23$,

Šířka záběru ostří $a_p=4,8$ mm,

Posuv na otáčku $f=0,07$ mm,

Řezná rychlost $v_c=40$ m/min.

Výpočet průřezu třísky:

$$A_D = a_p \cdot f \cdot \sin \varphi \text{ [mm}^2\text{]} \quad (4.1)$$

$$A_D = 4,8 \cdot 0,07 \cdot 1 = 0,34 \text{ mm}^2$$

kde:

a_p [mm] - šířka záběru ostří,

f [mm] - posuv na otáčku,

A_D [N/mm²] - průřez odřezávané vrstvy,

φ [°] - úhel nastavení ostří na směr hlavního pohybu.

Výpočet měrné řezné síly:

$$kc = hm^{-mc} \cdot kc_{1,1} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (4.2)$$

$$kc = 0.07^{-0,23} \cdot 1440 = 2654 \text{ N/mm}^2$$

kde:

mc [–] - nárůst měrné řezné síly v závislosti na tloušťce třísky,

hm [mm] - průměrná tloušťka třísky,

$kc_{1,1}$ [N/mm²] - měrná řezná síla pro oddělení průřezu 1 mm²,

kc [N/mm²] - měrná řezná síla.

Výpočet řezné síly:

$$F_c = kc \cdot a_p \cdot f \text{ [N]} \quad (4.3)$$

$$F_c = 2654 \cdot 4,8 \cdot 0,07 = 892 \text{ N}$$

kde:

F_c [N] - řezná síla,

a_p [mm] - šířka záběru ostří,

f [mm] - posuv na otáčku,

kc [N/mm²] - měrná řezná síla.

Obecně je známo, že při procesu zapichování vznikají tři síly (obr. 44). Z provedených experimentů vyplývá, že hodnota F_f se pohybuje o 30-40 % méně než F_c . Pasivní síla F_p nabývá velmi nízkých hodnot a to z toho důvodu, že nástroj je v axiálním směru pouze minimálně namáhán. Vznikají malé axiální síly, které se nedají zcela eliminovat. Axiální síly jsou způsobeny především vibracemi stroje při nedostatečné tuhosti soustavy stroj-nástroj-obrobek [72].

Výpočet posuvové síly:

$$F_f = 0,65 \cdot F_c \text{ [N]} \quad (4.4)$$

$$F_f = 0,65 \cdot 892 = 580 \text{ N}$$

kde:

F_f [N] - posuvová síla,

A_D [N/mm²] - průřez odřezávané vrstvy,

k_c [N/mm²] - měrná řezná síla.

Vzhledem k tomu, že síla F_p nabývá velmi nízkých hodnot, pro simulaci statické analýzy ji zanedbáme.

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \text{ [N]} \quad (4.5)$$

$$F = \sqrt{892^2 + 580^2 + 0^2} = 1063 \text{ N}$$

kde:

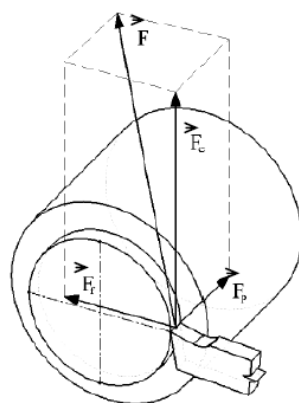
F [N] - celková síla,

F_f [N] - posuvová síla,

F_p [N] - pasivní síla,

F_c [N] - řezná síla.

Velikost jednotlivých složek reakčních sil jsou uvedeny v přílohách 5-9.



Obr 44. Rozložení sil F_c , F_r , F_p a F při zapichování [73].

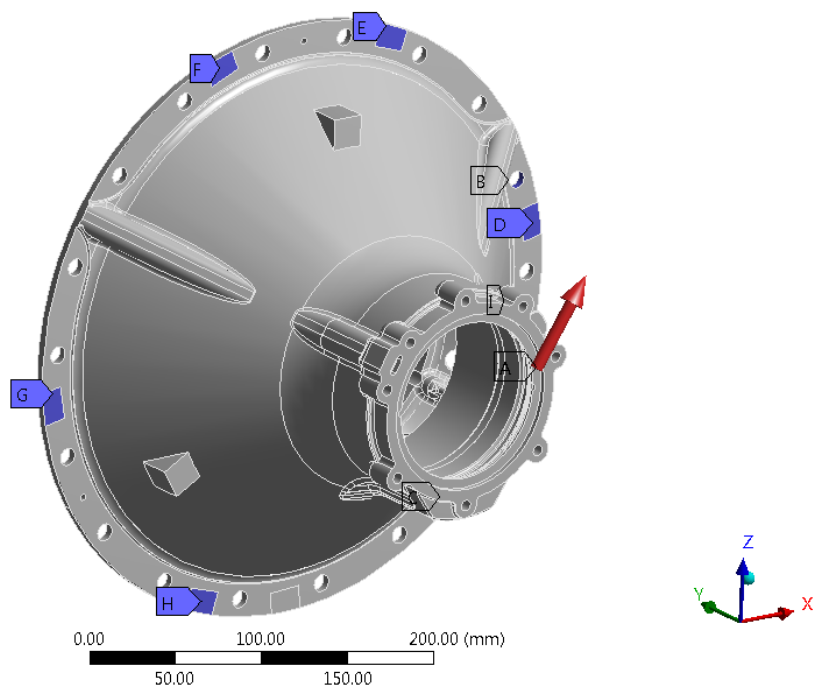
Výsledkem statické analýzy je zjištěna deformace a napětí, které vznikají v procesu zapichování v operaci 7. Z výsledků je patrné, že na základě působící celkové síly 1063 N vzniká v procesu lokální maximální redukované napětí von Mises 33,9 MPa (obr. 49), což činí cca 5 % meze kluzu pro titanovou slitinu Ti-6Al-4V. Dále je z (obr. 47, 48) patrné, že v místě působí síly je maximální deformace 0,015 mm. Statickou analýzou se potvrdilo, že novým způsobem upnutí nedochází ke vzniku nepříznivých deformací ani napětí, které by negativně ovlivnily výslednou geometrii dílce.

C: Static Structural

Static Structural

Time: 1. s

5/19/2016 10:18 PM

A Force: 1063.5 N**B** Kolík**C** Upinka 1**D** Upinka 2**E** Upinka 3**F** Upinka 4**G** Upinka 5**H** Upinka 6**I** Dosedací plocha příruby

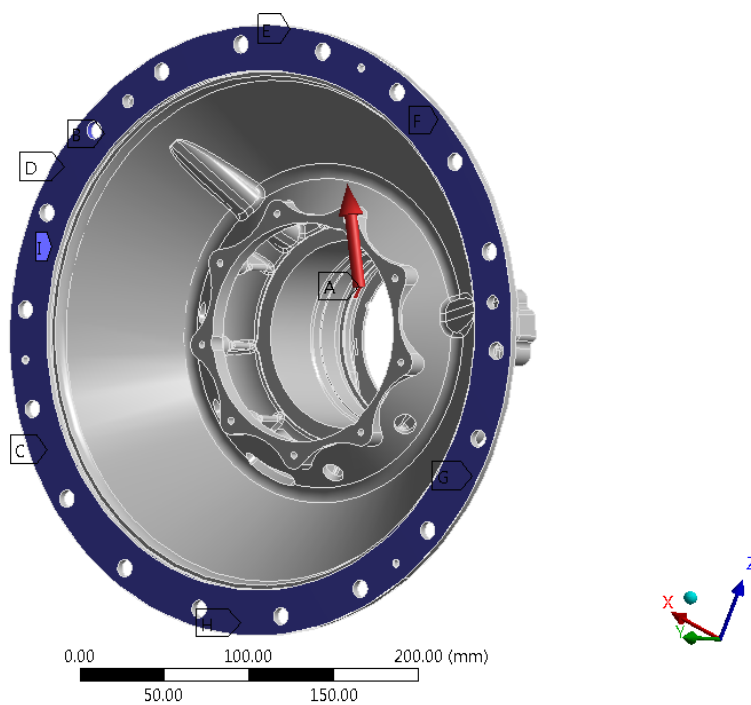
Obr 45. Způsob upnutí a směr výsledné síly F, upinky (C-H), aretační kolík (B).

C: Static Structural

Static Structural

Time: 1. s

5/19/2016 10:18 PM

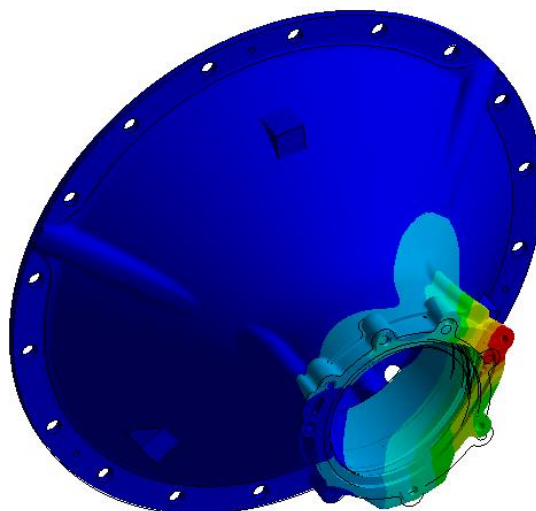
A Force: 1063.5 N**B** Kolík**C** Upinka 1**D** Upinka 2**E** Upinka 3**F** Upinka 4**G** Upinka 5**H** Upinka 6**I** Dosedací plocha příruby

Obr 46. Způsob upnutí a směr výsledné síly F, dosedací plocha příruby (I).

C: Static Structural

Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
5/12/2016 4:33 PM

0.015152 Max
0.013468
0.011785
0.010101
0.0084177
0.0067341
0.0050506
0.0033671
0.0016835
0 Min



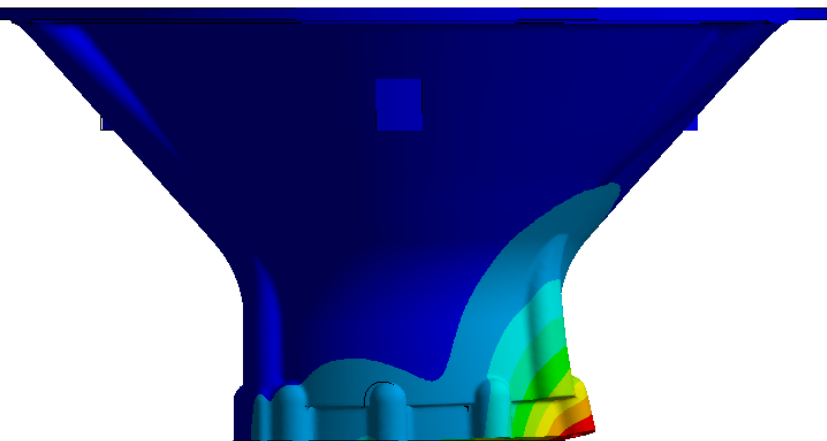
0.00 100.00 200.00 (mm)
50.00 150.00

Obr 47. Maximální deformace v místě řezu 0,015 mm.

C: Static Structural

Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
5/12/2016 4:33 PM

0.015152 Max
0.013468
0.011785
0.010101
0.0084177
0.0067341
0.0050506
0.0033671
0.0016835
0 Min



0.00 50.00 100.00 (mm)
25.00 75.00

Obr 48. Maximální deformace v místě řezu 0,015 mm (rovinna XY).

C: Static Structural

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

5/12/2016 4:35 PM

33.895 Max

30.129

26.363

22.597

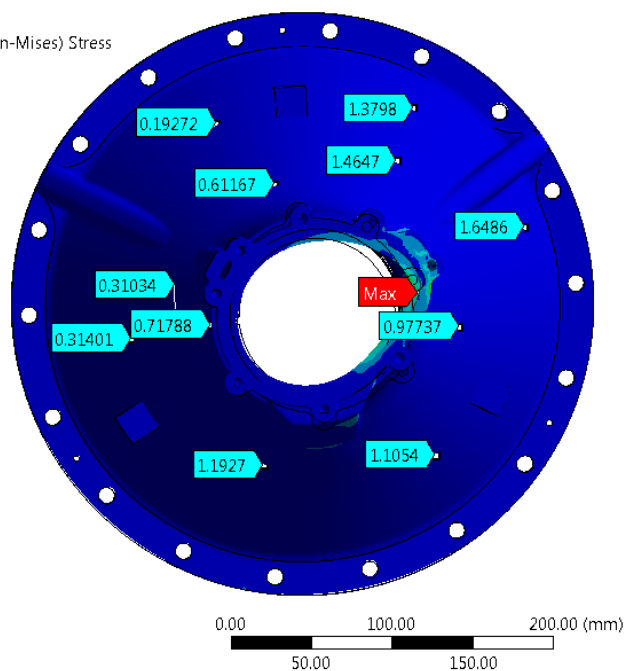
18.831

15.065

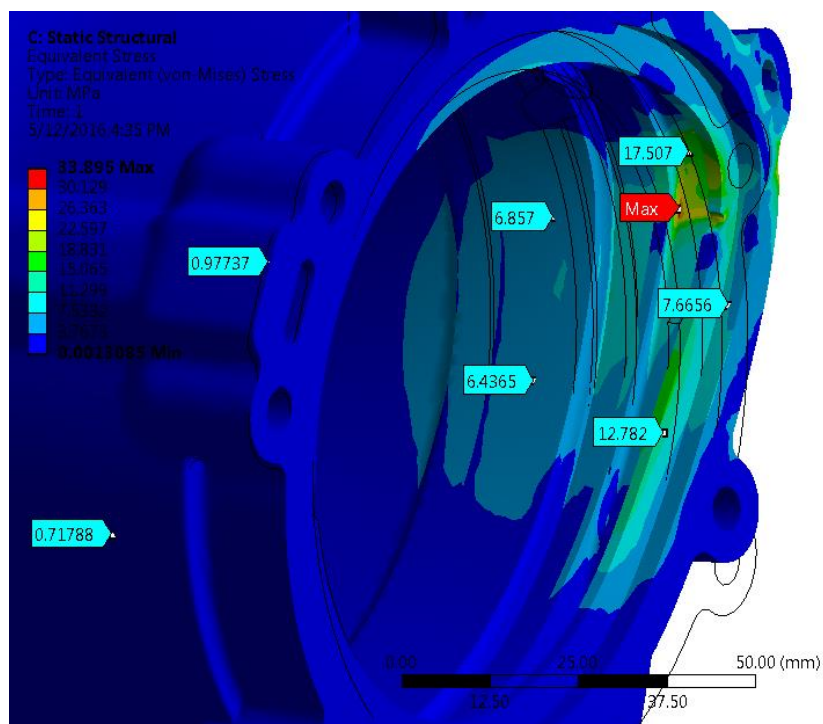
11.299

7.5332

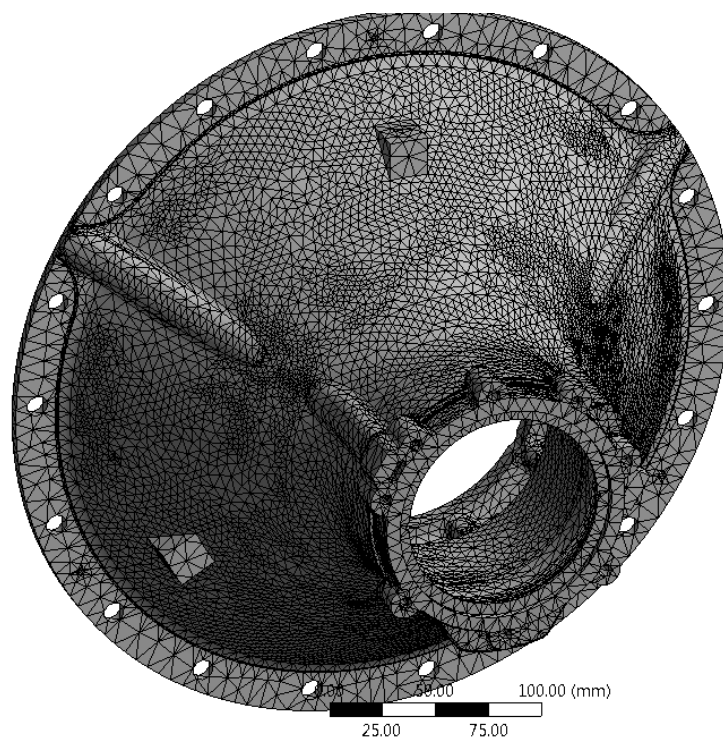
3.7673

0.0013085 Min

Obr 49. Maximální redukované napětí von Mises 33,89 MPa.



Obr 50. Maximální redukované napětí von Mises v místě řezu (Detail).



Obr 51. Síť modelu (181 000 uzlů).

5 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Následující kapitola je věnována technicko ekonomickému zhodnocení výroby součásti *Podpora ventilátoru* pro odhadovaný objem výroby 95 kusů. Zhodnoceny jsou výhradně obráběcí operace, které byly předmětem této diplomové práce.

(Veškeré cenové sazby uvedené v kapitolách 6.2.2, 6.2.4 a 6.2.5 jsou pouze ilustrativní a slouží k teoretickým výpočtům)

5.1 Technické zhodnocení

Novým technologickým postupem, který částečně vychází z původního postupu, je možné obrábět *Podporu ventilátoru* na novém soustružnicko frézovacím CNC centru DMC 80 FD duoBLOCK. Tímto přesunem je zajištěna úleva současně využívaným obráběcím strojům a pracovištím, které mohou vykonávat práci jinou. Přestože výroba ve firmě Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. je převážně kusová, tak s ohledem na vysoké portfólio výrobků se vyplatí investovat do nového stroje, který má širší využití a progresivní technologie zajišťující větší produktivitu. Jelikož se ve velké většině jedná o výrobu tvarově složitých součástí, dochází tak k velkým ztrátám u přípravných časů jako je upínání, středění, kalibrování nástrojů a podobně. Použitím nového soustružnicko frézovacího centra je zajištěno nejen snížení počtu obráběcích operací, ale i značné snížení strojního času díky kombinaci vysokotlakého chlazení Jetstream a použitím nových řezných nástrojů. Vysokotlakým chlazením bylo zajištěno zvýšení produktivity obrábění o cca 25 %. Výsledkem této změny došlo ke značným úsporám ve výrobě.

Převodem dílce na nový stroj bylo třeba vymyslet a zkonstruovat dva nové přípravky, kterými je umožněno stroji provádět více operací na jedno upnutí. Tím bylo zajištěno, že počet upnutí při výrobě součásti klesl z celkového počtu 10 na 7. Příkladem je nahrazení operace vyjiskřování díry operací vrtání. Redukce počtu upnutí také pozitivně přispělo ke snížení rizika výskytu defektu způsobené nevhodným upnutím součásti.

5.2 Ekonomické zhodnocení

V této části je kladen důraz na analýzu a porovnání výrobních časů obráběcích operací nového a původního technologického postupu a jejím dopadem na roční finanční úsporu. Dále jsou zde rozebrány finanční úspory v řezných nástrojích a naopak vynaložené náklady, které se projeví ve formě nově vyrobených přípravků pro operace 6 a 7. Tuto kapitolu uzavírá celkové roční finanční úspory, které jsou výsledkem implementací nového technologického postupu obráběcích operací.

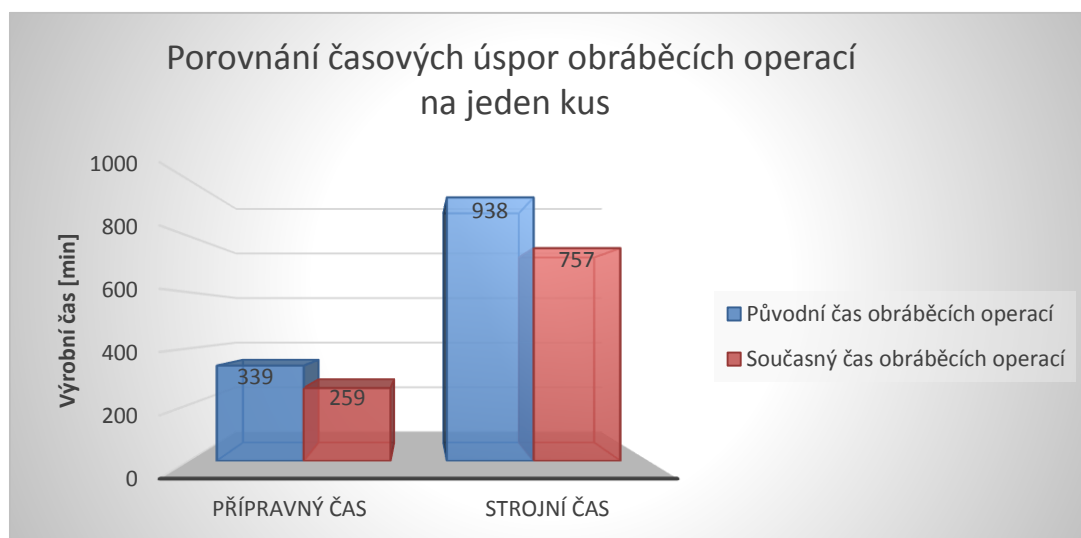
5.2.1 Porovnání výrobních časů obráběcích operací

V kapitole jsou porovnány přípravné a strojní časy předchozí a inovované technologie výroby.

Tab. 19 Porovnání předchozích a nových výrobních časů obráběcích operací [65].

Výrobní proces		Součást: Podpora ventilátoru Materiál: Ti-6Al-4V	Výrobní čas obráběcích operací [min]			
Op.	Typ operace	Popis	Přípravný čas		Strojní čas	
			PŘED	PO	PŘED	PO
2	Soustružení	Zarovnání ploch_tvorba základen	55	55	142	142
3	Soustružení	Zarovnání ploch_tvorba základen	30	30	36	36
4	Frézování-vrtání	Frézování čela, vrtání středící díry	59	59	118	118
6	Soustružení	Soustružení čela a průměrů_str. A	45	45	179	134
	Frézování-vrtání	Frézování drážek a vrtání děr	24	0	108	90
	Vrtání	Vrtání v dutině	15	0	70	10
7	Soustružení	Soustružení čela a průměrů_str. B	45	45	115	86
	Frézování-vrtání	Frézování drážek a vrtání děr	31	0	58	45
	Vrtání	Vrtání díry	10	0	20	4
10	Vyjiskřování-EDM	Vyjiskřování díry	10	10	24	24
18	Broušení	Broušení čela a vnitřního průměru	15	15	68	68
Celkový čas obráběcích operací PŘED a PO			339	259	938	757
Časová úspora nového technologického postupu na kus			80		181	

Tab. 19 porovnává přípravné a strojní časy původních a současných obráběcích operací. Zavedením nové technologie bylo dosaženo 80 minutové úspory na přípravném čase především zásluhou redukcí upnutí a tedy sloučením operací soustružení, frézování a vrtání. Z hlediska strojního času bylo uspořeno 181 min. zásluhou vysokotlakého chlazení Jetstream. Grafické znázornění časových úspor je zřejmé na obr. 52.



Obr. 52 Grafické znázornění časových úspor původních a současných obráběcích operací.

5.2.2 Náklady na strojní a přípravný čas na jeden kus

Velikost nákladů bývá v drtivé většině rozhodujícím faktorem při rozhodování jakým způsobem dílce vyrábět. V případě, že firma se rozhodne změnit technologii výroby, je nezbytně nutné brát ohled na mnoho faktorů jako jsou náklady na provoz, zaškolení, údržba, rentabilita a podobně. Tedy kromě technického přínosu je třeba brát na vědomí, zda technologie bude pro firmu i finančně výhodná. Náklady na strojní a přípravné operace jsou vyjádřeny v tab. 20, 21, 22, 23.

Tab. 20 Náklady na strojní op. jednoho kusu (předchozí technologie výroby).

Pracoviště	Operace	Provozní sazba [Kč/hod]	Strojní čas [hod]	Cena [Kč]
MOTCH 125 VNC	Soustružení	871	2.37	2064
ROMI HDL 33-20	Soustružení	871	0.59	514
Lancer 1250	Frézování-vrtání	871	1.96	1707
MOTCH 125 VNC	Soustružení	871	2.98	2598
MOTCH 125 VNC	Soustružení	871	1.92	1669
MITSUI SEIKI HS5A	Frézování-vrtání	871	2.77	2410
Elenix Drill CT 300	Vyjiskřování-EDM	871	0.33	287
Elenix Drill CT 300	Vyjiskřování-EDM	871	0.40	348
Avey DrillPress	Vrtání	871	1.17	1016
SI6/1 Ax 500	Broušení	871	1.13	984
Celkem				13599

Tab. 21 Náklady na přípravné op. jednoho kusu (předchozí technologie výroby).

Pracoviště	Operace	Sazba pracovníka [Kč/hod]	Přípravný čas [hod]	Cena [Kč]
MOTCH 125 VNC	Soustružení	400	0.92	368
ROMI HDL 33-20	Soustružení	400	0.50	200
Lancer 1250	Frézování-vrtání	400	0.98	392
MOTCH 125 VNC	Soustružení	400	0.75	300
MOTCH 125 VNC	Soustružení	400	0.75	300
MITSUI SEIKI HS5A	Frézování-vrtání	400	0.92	367
Elenix Drill CT 300	Vyjiskřování-EDM	400	0.16	64
Elenix Drill CT 300	Vyjiskřování-EDM	400	0.16	64
Avey DrillPress	Vrtání	400	0.25	100
SI6/1 Ax 500	Broušení	400	0.25	100
Celkem				2255

Tab. 22 Náklady na strojní op. jednoho kusu (nová technologie výroby).

Pracoviště	Operace	Provozní sazba [Kč/hod]	Strojní čas [hod]	Cena [Kč]
MOTCH 125 VNC	Soustružení	871	2.37	2064
ROMI HDL 33-20	Soustružení	871	0.59	514
Lancer 1250	Frézování-vrtání	871	1.96	1707
DMC 80 FD duoBLOCK	Soustružení	871	3.90	3397
	Frézování-vrtání			
	Vrtání			
DMC 80 FD duoBLOCK	Soustružení	871	2.20	1916
	Frézování-vrtání			
	Vrtání			
Elenix Drill CT 300	Vyjiskřování-EDM	871	0.40	348
SI6/1 Ax 500	Broušení	871	1.13	984
Celkem				10931

Tab. 23 Náklady na přípravné op. jednoho kusu (nová technologie výroby).

Pracoviště	Operace	Sazba pracovníka [Kč/hod]	Přípravný čas [hod]	Cena [Kč]
MOTCH 125 VNC	Soustružení	400	0.92	368
ROMI HDL 33-20	Soustružení	400	0.50	200
Lancer 1250	Frézování-vrtání	400	0.98	392
DMC 80 FD duoBLOCK	Soustružení	400	0.75	300
	Frézování-vrtání			
	Vrtání			
DMC 80 FD duoBLOCK	Soustružení	400	0.75	300
	Frézování-vrtání			
	Vrtání			
Elenix Drill CT 300	Vyiskřování-EDM	400	0.16	64
SI6/1 Ax 500	Broušení	400	0.25	100
Celkem				1724

5.2.3 Roční náklady na výrobní časy obráběcích operací pro výrobu 95 kusů

Výpočet strojních a přípravných časů původních obráběcích operací ve finančním vyjádření pro výrobu 95 kusů (5.1):

$$N_p = (N_{\Sigma t_{ASp}} + N_{\Sigma t_{BCp}}) \cdot n_r \text{ [Kč]} \quad (5.1)$$

$$N_p = (13599 + 2255) \cdot 95 = 1\,506\,130 \text{ Kč}$$

kde:

$N_p \text{ [Kč]}$ - roční náklady na výrobní čas původních obráběcích operací,
 $N_{\Sigma t_{ASp}} \text{ [Kč]}$ - náklady strojních časů původních obráběcích operací,
 $N_{\Sigma t_{BCp}} \text{ [Kč]}$ - náklady přípravných časů původních obráběcích operací,
 $n_r \text{ [ks]}$ - počet kusů na rok.

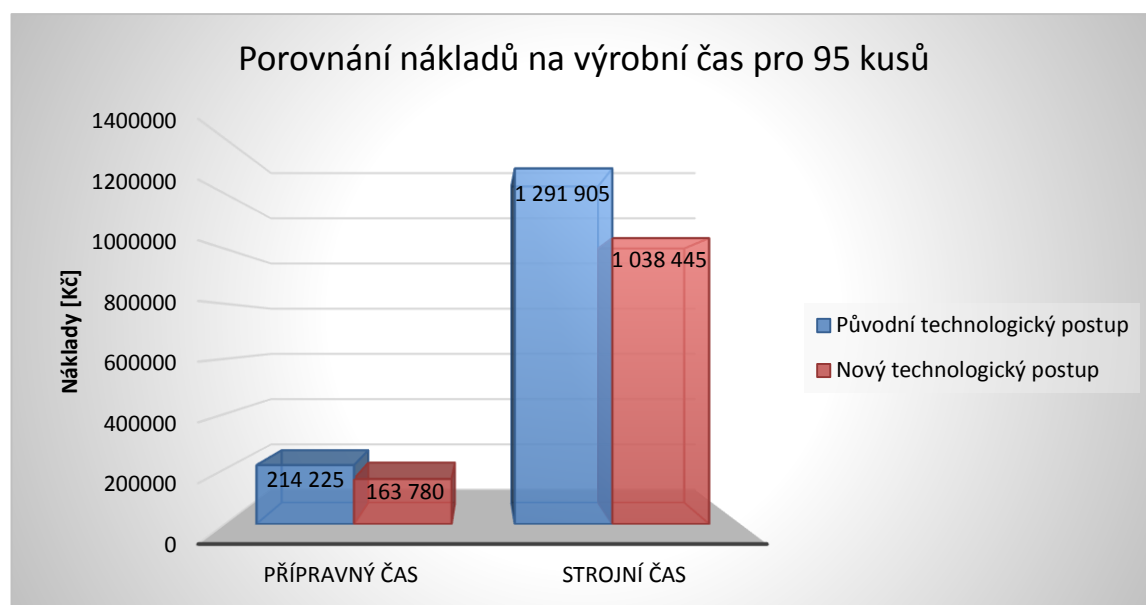
Výpočet strojních a přípravných časů nových obráběcích operací ve finančním vyjádření pro 95 kusů (5.2):

$$N_n = (N_{\Sigma t_{ASn}} + N_{\Sigma t_{BCn}}) \cdot n_r \text{ [Kč]} \quad (5.2)$$

$$N_n = (10931 + 1724) \cdot 95 = 1\,202\,225 \text{ Kč}$$

kde:

$N_n \text{ [Kč]}$ - náklady na výrobní čas nových obráběcích operací,
 $N_{\Sigma t_{ASn}} \text{ [Kč]}$ - náklady strojních časů nových obráběcích operací,
 $N_{\Sigma t_{BCn}} \text{ [Kč]}$ - náklady přípravných časů nových obráběcích operací,
 $n_r \text{ [ks]}$ - počet kusů na rok.



Obr. 53 Grafické znázornění ročních nákladů na výrobní čas původní a nově navržené technologie obráběcích operací.

Celková roční úspora strojních a přípravných časů (5.3):

$$U_{\zeta} = (N_p - N_n) [Kč] \quad (5.3)$$

$$U_{\zeta} = (1\,506\,130 - 1\,202\,225) = 303\,905 \text{ Kč}$$

kde:

$U_{\zeta}[Kč]$ - celková roční finanční úspora strojních a přípravných časů,
 $N_p[Kč]$ - roční náklady na výrobní čas původních obráběcích operací,
 $N_n[Kč]$ - roční náklady na výrobní čas nových obráběcích operací.

5.2.4 Úspory v řezných nástrojích

Společně se zavedením nového technologického postupu došlo k obměně řezných nástrojů, které zajistily vyšší trvanlivost a také značných finančních úspor, které jsou rozepsané v tabulce 24 a 25.

Tab. 24 Náklady na vybrané nástroje pro výrobu jednoho kusu (předchozí výroba).

Označení	Počet břitů	Cena	Spotřeba na op.
CNMG432P KC730 CNMG12408P	4	171	1
CNGP432 KC730 CNGP120408	4	258	1
CNMG432P KC730 CNMG12408P	4	171	1
CNGP431 KC730 CNGP120404	4	258	1
NGD41289LK TN6025	1	394	1
Vrták D6,9 DRCA IJL SK	1	2276	0.4
Závitník SA350-3 UNC(J) 5/16-18 3B	1	1071	0.2
DRILL MST 11775-6 072700-D4,1	1	3514	0.25
Náklady na řezné nástroje na 1 kus [Kč]	3876		

Tab. 25 Náklady na vybrané nástroje pro výrobu jednoho kusu (nová výroba).

Označení	Počet břitů	Cena [Kč]	Spotřeba na op. [ks]
WNMG 080408-4 TN6025	6	196	0.16
WNMG 080404-4 TN6025	6	196	0.85
WNMG 080408-4 TN6025	6	196	0.16
WNMG 080404-4 TN6025	6	196	0.5
NGD4189LK KC730 1114392	1	404	0.5
Vrták šroubovité s vnitřním chlazením D4,1 ANAJ-039680-D04100/3D	1	1232	0.2
Závitník TL351 VS-3 5/16-18 UNC 2B	1	1168	0.1
Vrták šroubovité s vnitřním chlazením D6,9 KCM15	1	1953	0.16
Náklady na řezné nástroje na 1 kus [Kč]	1205		
Průměrné zvýšení trvanlivosti [%]	57		

Celková roční finanční úspora v řezných nástrojích (5.4):

$$U_N = (U_{Np} - U_{Ns}) \cdot n_r \text{ [Kč]} \quad (5.4)$$

$$U_N = (3876 - 1205) \cdot 95 = 253\,745 \text{ Kč}$$

kde:

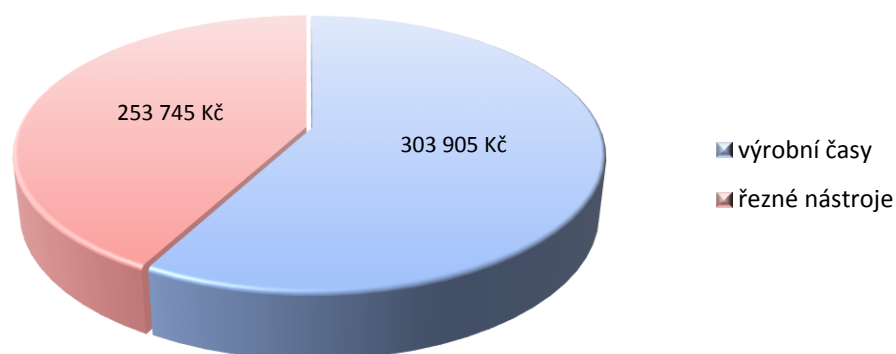
U_N [Kč] - roční finanční úspora řezných nástrojů,

U_{Np} [Kč] - náklady na vybrané řezné nástroje původních obr. operací,

U_{Ns} [Kč] - náklady na vybrané řezné nástroje nových obr. operací,

n_r [ks] - počet kusů na rok.

Roční úspory vzniklé snížením výrobního času a použitím nových řezných nástrojů 557 650 Kč



Obr. 54 Grafické znázornění ročních úspor za snížení výrobního času a použití nových řezných nástrojů.

5.2.5 Náklady na přípravky

Kromě úspor vyplývajících z implementování nového obráběcího centra a obměnou řezných materiálů, je třeba zde zmínit i náklady (tab. 26), které byly vynaloženy na konstrukci a výrobu nových přípravků pro operace 6 a 7.

Tab. 26 Náklady na přípravky použité v nové výrobě.

Operace	Přípravek pro op. 6	Přípravek pro op. 7
Konstrukce [Kč]	31 280	31 050
Výroba [Kč]	54 694	44 275
Suma [Kč]	85 974	75 325

Celkový součet nákladů na konstrukci a výrobu přípravků pro operaci 6 a 7 činí 161 299 Kč. Jelikož je počítána roční úspora a hodnota přípravku se odepisuje čtyři roky, je třeba tuto sumu vydělit čtyřma což činí 40 325 Kč.

5.2.6 Celkové roční finanční úspory vzniklé inovací technologického postupu

$$U_{CR} = U_{\check{c}} + U_N - N_P [K\check{c}] \quad (5.5)$$

$$U_{CR} = 303\,905 + 253\,745 - 40\,325 = 517\,325 \text{ Kč}$$

kde:

$U_{CR} [K\check{c}]$ - celková roční finanční úspora obráběcích operací,

$U_{\check{c}} [K\check{c}]$ - celková roční finanční úspora strojních a přípravných časů,

$U_N [K\check{c}]$ - celková roční finanční úspora řezných nástrojů,

$N_P [K\check{c}]$ - roční náklady na přípravky,

ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na zefektivnění výroby součásti z titanové slitiny Ti-6Al-4V, která je součástí proudového motoru TFE 731. Primární důraz byl kladen na zkrácení výrobního času a snížení počtu upnutí součásti při obráběcích operacích. Redukce upnutí a zkrácení výrobního času bylo dosaženo převodem výroby na soustružnicko frézovací centrum DMC 80 FD duoBLOCK. S převodem výroby souvisela i tvorba nového technologického postupu obráběcích operací a obnova řezných nástrojů, které pozitivně přispěly ke zvýšení produktivity a celkové úspoře. Dosažená redukce upnutí byla zajištěna implementací dvou nových přípravků, kterými bylo umožněno provádět efektivněji více obráběcích operací na jedno upnutí.

Převodem roční výroby 95 kusů na soustružnicko frézovací centrum DMC 80 FD duoBLOCK a použitím nových řezných nástrojů bylo dosaženo následujících výsledků:

- Díky progresivní technologii vysokotlakého chlazení Jetstream byl zkrácen strojní čas všech obráběcích operací o 25 %. Touto redukcí bylo dosaženo celkového snížení strojního času o 287 hod. Snížením strojního času bylo dosaženo úspory 253 460 Kč.
- Výrobou a aplikací dvou přípravků byl zredukován počet upnutí při obráběcích operacích z počtu 10 na 7. Redukcí se dosáhlo snížení přípravného času o 127 hod. Výsledkem redukce času vznikla úspora 50 445 Kč. Redukce počtu upnutí také pozitivně přispělo ke snížení rizika výskytu defektu způsobené nevhodným upnutím součásti.
- Použitím výkonnějších řezných nástrojů se průměrně zvýšila trvanlivost o 57 %, a celkově bylo dosaženo úspor 253 745 Kč.
- Po odečtení ročních nákladů na přípravky od ročních úspor vyplývajících ze zkrácení výrobních časů a implementací nových nástrojů, činí celková roční úspora 517 325 Kč.

Doporučení:

Jelikož výměna řezných nástrojů z důvodu opotřebení je závislá na intuici a zkušenostech technologa, doporučil bych z důvodu nízké trvanlivosti řezných nástrojů provést testy a zjistit Taylorovu závislost řezné rychlosti na trvanlivosti a stanovit tak lepší poměr z hlediska trvanlivosti VBD.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Bombardier Learjet 40 XR. *Myjetreview* [online]. [vid. 2016-03-31]. Dostupné z: <http://myjetreview.com/html/10-learjet-40xr.html>
2. Gunston, Bill (2006). *World Encyclopedia of Aero Engines*, 5th Edition. Phoenix Mill, Gloucestershire, England, UK: Sutton Publishing Limited. ISBN 0-7509-4479-X.
3. Leyes II, Richard A.; William A. Fleming (1999). "10". *The History of North American Small Gas Turbine Aircraft Engines*. Washington, DC: Smithsonian Institution. ISBN 1-56347-332-1.
4. *Findaircraft: TFE 731* [online]. [vid. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.findaircraft.com/featured/pollard/turbineengines.htm>
5. *Vwovrtext HTF731* [online]. 2004 [vid. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://forums.vwvortex.com/showthread.php?7063968-Progression-of-Hybrid-vehicle-technology-next-stop-gas-turbines>
6. History of Titanium. *Http://titanium.com/* [online]. 2016 [vid. 2016-02-18]. Dostupné z: <http://titanium.com/technical-data/history-of-titanium/>
7. TOLKNER, Josef. *Analýza vlivu obráběného materiálu na opotřebení a trvanlivost opotřebení nástroje*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
8. GAGNON, Steve. The Element Titanium. *Http://education.jlab.org/* [online]. 2014 [vid. 2016-02-18]. Dostupné z: <http://education.jlab.org/itselemental/ele022.html>
9. ZHANG, Wensheng, Zhaowu ZHU a Chu Yong CHENG. A literature review of titanium metallurgical processes. *Hydrometallurgy*. 2011, (3-4), 177-188.
10. KADLEC, Tomáš. *Rutil – oxid titaničitý, TiO₂* [online]. 2015 [vid. 2016-02-18]. Dostupné z: <http://www.mineralogist.cz/rutil-ledec-nad-sazavou>
11. ILMENIT - FeTiO₃. *Http://geologie.vsb.cz/* [online]. 2010 [vid. 2016-02-18]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/rudy/ilmenit.html>
12. Minerální pigment - Oxid titaničitý. *Http://www.manipura.cz/* [online]. 2011 [vid. 2016-02-18]. Dostupné z: <http://www.manipura.cz/products/mineralni-pigment-oxid-titanu-bily-8-g/>
13. *Microstructure and Properties of Materials*. London: World Scientific Publishing CO. Pte. Ltd, 2000. ISBN 981-02-4180-1.
14. KARÁSEK, Jan. *Obrábění titanových slitin*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCE	List 66
---------	-----------------	---------

15. LEYENS, CH., PETERS, M. Titanium and titanium alloys. 2. vyd. DLR – German Aerospace Center., Köln, Germany, 2005, 513 s. ISBN 3-527- 30534-3
16. *Vysokocyklická únava titanové slitiny Ti6Al4V*. Fakulta strojního inženýrství, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
17. LÜTJERING, Gerd a James C. WILLIAMS. *Titanium*. New York: Springer, 2003. ISBN 35-404-2990-5.
18. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-720-4283-1.
19. KLAPKOVÁ, Alena. *MECHANICKÉ VLASTNOSTI TITANOVÝCH SLITIN*. Brno, 2012. Bakalářská. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. STANISLAV VĚCHET, CSc.
20. Slitiny titanu. In: *CVUT* [online]. 2014 [vid. 2016-02-21]. Dostupné z: users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/05_Slitiny%20Ti.ppt
21. *Titanium alloy guide* [online]. 2000 [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: <http://www.rtiintl.com/Titanium/RTI-Titanium-Alloy-Guide.pdf>
22. FÜRBAACHER, J. a kolektiv. Lexikon technických materiálů. 1. vyd. Praha: VERLAG DASHOFER. 2001. ISBN 80-86229-02-5
23. ASTM International Standards worldwide: ASTM B265 - 09 Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Strip, Sheet, and Plate [online]. c1996-2012 [vid. 2012-04-15]. Dostupný z WWW: <http://www.astm.org/Standards/B265.htm>
24. *Titanium and Titanium alloys* [online]. 2003 [vid. 2016-02-21]. ISBN 3-527-30534-3. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=okSA1N1xAxgC&pg=PA37&lpg=PA37&dq=titanium+disadvantages&source=bl&ots=WhK7AVsn6I&sig=2cz3Q2zKmg6_zHtyfSOGWp6b8aA&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwjumcDvw4nLAhUG4XIKHYwKAJ8Q6AEIVDAH#v=onepage&q=titanium%20disadvantages&f=false
25. Titan a jeho slitiny. *Http://ateam.zcu.cz/* [online]. 2010 [vid. 2016-02-21]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Nikl_titan.pdf
26. DEPUY HIP IMPLANT RECALL. *Coleman legal partners* [online]. 2015 [vid. 2016-02-20]. Dostupné z: <http://colemanlegalpartners.ie/depu-hip-implant-recall/>
27. ZDRAVO, Kreni. Što biste trebali znati o zubnim implantatima? *Krenizdravo* [online]. 2015 [vid. 2016-02-20]. Dostupné z: <http://www.krenizdravo.rtl.hr/zdravlje/zubi/sto-biste-trebali-znati-o-zubnim-implantatima>

28. Ti6Al4V Titanium Alloy. In: ARCAM EBM system [online]. 2014 [vid. 2016-02-20]. Dostupné z:
<http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Ti6Al4V-Titanium-Alloy.pdf>
29. SEDLAČEK, V. Únava hliníkových a titanových slitin. 1. vyd. Praha: Statni nakladatelství technické literatury SNTL, 1989. 352 s. ISBN 80-03-001180-3.
30. ŽAK, J., SAMEK, R., BUMBALEK, B. Speciální letecké technologie I. 1. vyd. Brno: tisk MTZ, provoz 34 Kyjov, 1990, 219 s. ISBN 80-214-0128-1.
31. BUMBÁLEK, Bohumil, Petr VALA a Zdeněk NOVÁK. Vlastnosti povrchové vrstvy slitiny titanu VT6 a VT8. Brno, září 1988. Technická zpráva. Výzkumný ústav 070 Brno. Vedoucí práce Bohumil Bumbálek.
32. NESLUŠAN, M., CZAN, A. Obrábanie titanových a niklových zliatin. 1. vyd. Žilina: EDIS, 2001, 195 s. ISBN 80-7100-933-4.
33. FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 220 s. ISBN 80-214-2374-9
34. RIBERIO, M.V., M.R.V. MOREIRA a J.R. FERREIRA. Optimization of titanium alloy (6Al-4V) machining. Journal of Materials Processing Technology. 2003, č. 143, s. 458-463. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00457-6. Dostupné z:
www.elsevier.com/locate/jmatprotec
35. SANDWIK COROMANT AB. Technická příručka obrábění: soustružení-frézování-vrtání-vyvrtávání-upínání nástrojů. Elanders, 2005.
36. PTÁČEK, L. a kolektiv. Nauka o materiálu II. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1999. 352 s. ISBN 80-1204-130-4.
37. NESLUŠAN, M., CZAN, A. Obrábanie titánových a niklových zliatin. 1. vyd. Žilina: EDIS, 2001, 195 s. ISBN 80-7100-933-4.
38. MIKOVEC, Miroslav et al. Obrábění těžkoobrobitelných materiálů. 1. vyd. Praha: Statni nakladatelství technické literatury SNTL, 1963, 315 s. Redakce strojírenské literatury.
39. FOREJT, M., HUMÁR, A., PÍŠKA, M., JANÍČEK, L. Experimentální metody [online]. SYLABUS pro magisterský studijní program 23-01-T "Strojní inženýrství". obor strojírenská technologie – obrábění – tváření, svařování - management. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003, 83 s. Dostupné na WWW:<http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody__cv_ice_ni__forejt_piska_humar_janicek.pdf >

40. FILIPČÍK, Jiří. *OPTIMALIZACE VÝROBY DÍLU PRO LETECKÝ PRŮMYSL*. Brno, 2009. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18632. Diplomová. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Miroslav Píška.
41. VASILKO, K. *Analytická teoria trieskového obrábania*. Prešov: Fakulta výrobných technológií TU v Košiciach, 2007. 485 s. ISBN 978-80-8073-759-7.
42. DIVIŠ, V. Poznatky z obrábění titanových slitin TiAl6V4. *MM Průmyslové spektrum*. 2003, č. 9, s. 83. Dostupný z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/poznatky-z-obrabeni-titanovych-slitintial16v4>.
43. SHAW, M.C. *Metal cutting principles*. [s.l.] : Oxford University Press, 2005. 594 s. ISBN 0-19-859020-2.
44. VASILKO, K. *Analytická teoria trieskového obrábania*. Prešov : Fakulta výrobných technológií TU v Košiciach, 2007. 485 s. ISBN 978-80-8073-759-7.
45. LUNDBAD, M. *Optimizing Titanium alloy machining by applying information gained from FE simulations*. AB Sandvik Coromant, Sweden. Dostupné z WWW : <http://www.ufc.com.cn/ufc/sandvic.pdf>
46. ŘASA, J. Obrábění těžkoobrobitelných materiálů. *Svět strojírenské techniky : Čtvrtletník svazu strojírenské technologie*. 2008, roč. 6, č. 2, s. 8. Dostupný z WWW: http://www.sst.cz/download/pdf/svet_stroj_tech200802_complete.pdf.
47. Directed High-Pressure Coolant Tooling. *MM Spektrum* [online]. Fagersta, 2013 [vid. 2016-05-01]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/sv/Global/presscentre/Left/Archive-2013/Directed-High-Pressure-Coolant-Tooling/>
48. *Nástroje se směrovaným přívodem chladicí kapaliny pod vysokým tlakem* [online]. MEPAX, 2013 [vid. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://m.mmspektrum.com/novinky/nastroje-se-smerovany-privodem-chladici-kapaliny-pod-vysokym-tlakem>
49. *Jetstream tooling* [online]. , 32 [vid. 2016-05-01]. Dostupné z: https://www.secotools.com/CorpWeb/north_america/Literature_brochures/Brochure/2008_Jetstream_brochure.pdf
50. Shane Y. Hong, Irel Markus, Woo-cheol Jeong: New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V: *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41 (2001) 2245–2260

51. Aznijar Ahmad-Yazid, Zahari Taha, Indra Putra Almanar: A review of cryogenic cooling in high speed machining (HSM) of mold and die steels: Scientific Research and Essays Vol. 5 (5), pp. 412-427, 4 March, 2010

52. *Rozhodující je použití efektivního chlazení* [online]. 2014 [vid. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/rozhodujici-je-pouziti-efektivniho-chlazení.html>

53. *EMO Hannover 2013: část 9 - multifunkční obráběcí technika* [online]. SEO, 2014 [vid. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/emo-hannover-2013-cast-9-multifunkcni-obrabeci-technika.html>

54. *Kryogenické frézování těžkoobrobitelných materiálů* [online]. SEO, 2014 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.cnckonstrukce.cz/novinka-121/kryogenicke-frezovani-tezkoobrobitelnych-materialu.html>

55. Obráběcí stroje a technologie. *Mmspektrum* [online]. 2014 [vid. 2016-04-06]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/svetove-premiery-v-bavorskych-alpach.html>

56. Výkonové frézování. *MM Spektrum* [online]. 2014, (11), 52 [vid. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vykonove-frezovani.html>

57. *Trochoidní frézování* [online]. Brno, 2014 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/cs/Global/Services--Support/Tool-Selection-Support/Trochoidal-Milling/>

58. *Problematika obrábění titanových leteckých dílů* [online]. SEO, 2012 [vid. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/problematika-obrabeni-titanovych-leteckych-dilu.html>

59. Příručka pro technology: Dynamické frézování - využití kompenzačního přístupu. *MM Spektrum* [online]. 2013, (7), 82 [vid. 2016-05-01]. DOI: 130722. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-dynamicke-frezovani-vyuziti-kompenzacniho-pristupu.html>

60. MEJZESOVA, Monika. *ZEFEKTIVNĚNÍ VÝROBY STATORU PRO LCV 20 POMOCÍ CNC HORIZONTÁLNÍ VYVRTÁVAČKY ŠKODA FCW 150*. Brno, 2009. Diplomová. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce MIROSLAV PÍŠKA.

61. *Machining Navigator* [online]. 2015 [vid. 2016-05-18]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/cs/Global/Services--Support/Machining-Navigator/>

62. *Aktuální Katalogy Kennametal* [online]. 2015 [vid. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.jan-havelka.cz/kennametal-pdf.html>

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCE	List	70
---------	-----------------	------	----

63. Sandvik Coromant digitalní knihovna. *Sandvik Coromant* [online]. USA, 2015 [vid. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/downloads/pages/default.aspx>
64. WIDIA Master Catalog 2017. *WIDIA* [online]. USA, 2016 [vid. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.widia.de/en/resources/downloads.html>
65. SAP: Technologický postup. Mariánské Údolí-Hlubočky.
66. Interní dokumentace: Návodky. Mariánské Údolí-Hlubočky.
67. DMC 80 FD duoBLOCK®. [Http://cz.dmgmori.com/](http://cz.dmgmori.com/) [online]. 2015 [vid. 2016-02-19]. Dostupné z: <http://cz.dmgmori.com/products/milling-machines/5-axis-universal-machining-centres-with-a-pallet-changer/dmc-fd-duoblock/dmc-80-fd-duoblock-4th-generation#Intro>
68. Hybrid Manufacturing of 3D Aerospace Parts To Finish Quality. *Fabricatingandmetalworking* [online]. 2016 [vid. 2016-04-11]. Dostupné z: <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2016/02/hybrid-manufacturing-of-3d-aerospace-parts-to-finish-quality/>
69. Deckel Maho Pfronten continúa la tradición de la tecnología. *Interempresas* [online]. 2015 [vid. 2016-04-11]. Dostupné z: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/134986-Deckel-Maho-Pfronten-continua-la-tradicion-de-la-tecnologia.html>
70. TOMAN, Martin. *SYSTÉM SINUMERIK PŘI SYNCHRONNÍM PROGRAMOVÁNÍ CNC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Aleš POLZER.
71. *The essential material characteristics of Ti 6Al-4V* [online]. [vid. 2016-05-08]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/en/Global/Segment-Solutions/Aerospace-Solutions/AS-Material-main/Titanium-based-alloys/Inconel-71811/>
72. POLÁČKOVÁ, Naděžda. *MODERNÍ ŘEZNÉ NÁSTROJE PRO ZAPICHOVÁNÍ A UPICHOVÁNÍ*. Brno, 2011. Diplomová. VUT Brno. Vedoucí práce Miroslav Piška.
73. MATOUŠEK, Jan. *Moderní řezné nástroje pro zapichování a upichování*. Brno, 2015. Diplomová. VUT Brno. Vedoucí práce Miroslav Piška.
74. *TFE731 Major Aircraft Platforms* [online]. [vid. 2016-03-06]. Dostupné z: <http://www.bbaaviationero.com/engines/honeywell/tfe731>
75. 12. MACEK, K., JANOVEC, J., JURČI, P., ZUNA, P. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006, 164 s. ISBN 80-01-03513-1.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
A	[-]	tažnost
Al	[-]	hliník
Al ₂ O ₃	[-]	korund
BCC	[-]	prostorově středěná krystalická mřížka
CNC	[-]	computer numerical control
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti v tahu
F _c	[N]	řezná síla
FCC	[-]	kubická plošně středěná mřížka
HB	HB	tvrdost podle Brinella
HCP	[-]	šesterečná mřížka
HRC	HRC	tvrdost podle Rockwella
KT	[mm]	čelní opotřebení
Mg	[-]	hořčík
PCD	[-]	Polykrystalline diamond
PVD	[-]	Physical Vapour Deposition-fyzikální metoda nanášení povlaku na nástroj
Q _o	[J]	teplo odvedené do obrobku
Q _{pe}	[J]	teplo vzniklé v oblasti prim. plast. def.
Q _{pr}	[J]	teplo odvedeno do prostředí
Q _t	[J]	teplo odvedeno třískou
Q _α	[J]	teplo vzniklé třením o přech. plochu
Q _γ	[J]	teplo vzniklé třením tříška/čelo nás.
R _a	[μm]	střední aritmetická hodnota drsnosti
R _e	[MPa]	mez kluzu
R _m	[MPa]	mez pevnosti
R _{p0,2}	[MPa]	smluvní mez kluzu
R _z	[μm]	nejvyšší výška profilu povrchu
SK	[-]	slinutý karbid
Ti	[-]	titan
TiC	[-]	karbid titanu
VB	[mm]	opotřebení na čele
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička
WC	[-]	karbid wolframu

Zkratka	Jednotka	Popis
a_e	[mm]	radiální hloubka řezu
a_p	[mm]	axiální hloubka řezu
f_n	[mm]	posuv na otáčku
f_z	[mm]	posuv na zub nástroje
h_m	[mm]	průměrná tloušťka třísky
k_c	[Mpa]	měrná řezná síla
kg	kg	hmotnost
κ_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří nástroje
lbs	[lbs]	libry
m^3	[-]	kubický metr
mc	[-]	nárůst měrné řezné síly v závislosti na tloušťce třísky
r_e	[mm]	poloměr zaoblení ostří
t	[s]	čas
v_c	[m/min]	řezná rychlost
v_f	[mm/min]	posuvová rychlost
α -fáze	[-]	fáze alfa
β -fáze	[-]	fáze beta
γ	[°]	úhel čela nástroje
γ -fáze	[-]	fáze gama
σ	[Mpa]	napětí zpevněné povrchové vrstvy
Φ	[°]	úhel roviny stříhu, úhel sklonu primární plastické deformace AB

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Aplikace modifikací motoru TFE 731
Příloha 2	Vlastnosti a použití vybraných slitin titanu
Příloha 3	Technické parametry stroje DMC 80 FD DuoBlock
Příloha 4	Chladicí systém stroje DMC 80 FD DuoBlock
Příloha 5	Statická analýza - hodnoty reakčních sil upínek C a D
Příloha 6	Statická analýza - hodnoty reakčních sil upínek E a F
Příloha 7	Statická analýza - hodnoty reakčních sil upínek G a H
Příloha 8	Statická analýza - hodnoty reakčních sil kolíku B a I
Příloha 9	Silová rovnováha složek F_x , F_y a F_z
Příloha 10	Původní výroba - operace 2, 3 (soustružení, zarovnání ploch a základen)
Příloha 11	Původní výroba - operace 4, 6 (soustružení, vrtání, frézování)
Příloha 12	Původní výroba - operace 7 (soustružení)
Příloha 13	Původní výroba - operace 8 (frézování, vrtání)
Příloha 14	Původní výroba - operace 10, 11 (vyjiskřování)
Příloha 15	Původní výroba - operace 12, 20 (vrtání, broušení)

PŘÍLOHA 1

Aplikace modifikací motoru TFE 731 [74].

ENGINE	AIRCRAFT
TFE731-2C-1C	Falcon 10/100
TFE731-2C-3B	Learjet 31/31A
TFE731-2C-2B/-3B	Learjet 35/36/35A Century III/35A/36A
TFE731-3-1C	Falcon 50
TFE731-3-1E	Jetstar 731 Conversion
TFE731-3-1F	Jetstar II
TFE731-3A-200G	Astra 1125/SP
TFE731-3A/R-2B/-3AR-2B1	Learjet 55/55C/55B
TFE731-3B-100S	Citation VI
TFE731-3C-100S	Citation III
TFE731-3D-1G	Westwind 1124/1/2
TFE731-3R-1D	Sabreliner 65
TFE731-3R-1H	Hawker HS125-700A
TFE731-4R-2S	Citation VII
TFE731-5	Falcon 900A
TFE731-5BR	Hawker 750/800XP/850XP, Falcon 20-5
TFE731-5R-1H	Hawker 800/800A
TFE731-20BR	Learjet 40/40XR/45/45XR
TFE731-40	Falcon 50EX
TFE731-40R-200G	Gulfstream G100, Astra 1125SPX
TFE731-40AR-200G	Gulfstream G150
TFE731-40BR	Learjet 70/75
TFE731-50	Hawker 900XP
TFE731-60	Falcon 900DX/EX/EX EASy/LX

PŘÍLOHA 2

Vlastnosti a použití vybraných tvářených slitin titanu [75]

Druhy slitin	Stav	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Vlastnosti a použití
slitiny α					
Ti-Al5-Sn2,5	ž	860	800	16	svařitelné výkovky a plechy; lopatky leteckých motorů a parních turbín
Ti-Al2-Mo4-Sn11	dž	1000	895	10	
slitiny pseudo α					
Ti-Al8-Mo1-V1	dž	950	890	15	dobrá svařitelnost, houževnatost, žárupevnost do 450 °C; součásti draků a turbokompresorů letadel do 550 °C
Ti-Al8-Zr11-Nb1-Mo-Si	kp	1100	1050	10	
Ti-Al6-Mo2-Zr4-Sn2-Si	dž	940	860	15	
slitiny $\alpha+\beta$					
Ti-Al6-V4	ž	950	880	14	součásti leteckých motorů do 400 °C; tlakové nádoby, čerpadla na plyny a chemikálie, kryogenní součásti; zbraně, plavidla, skříně raketových motorů, děla; podvozky letadel, součástí leteckých turbín do 450 °C; součásti turbokompresorů až do 500 °C
	kp	1170	1100	10	
Ti-Al6-V6-Sn2	ž	1050	990	14	
	kp	1170	1100	10	
Ti-Al6-Mo2-Cr2-Fe-Si	kp	1450	1150	7	
Ti-Al6-Mo4-Zr2-Si	ž	1150	1050	12	
slitiny pseudo β					
Ti-V8-Mo8-Fe2-Al3	kp	1240	1170	8	výkovky pro součásti letadel a raket; větší houževnatost
Ti-V5-Mo5-Al3-Cr-Fe	ž	1150	1100	13	
slitiny β					
Ti-V13-Cr11-Al3	kp	1220	1150	8	dobrá tvařitelnost; svorníky a panely součástí kosmických lodí
Ti-Mo11-Zr6-Sn5	kp	1390	1320	11	vysokopevné svorníky a součásti letadel, jen plechy

Pozn. :

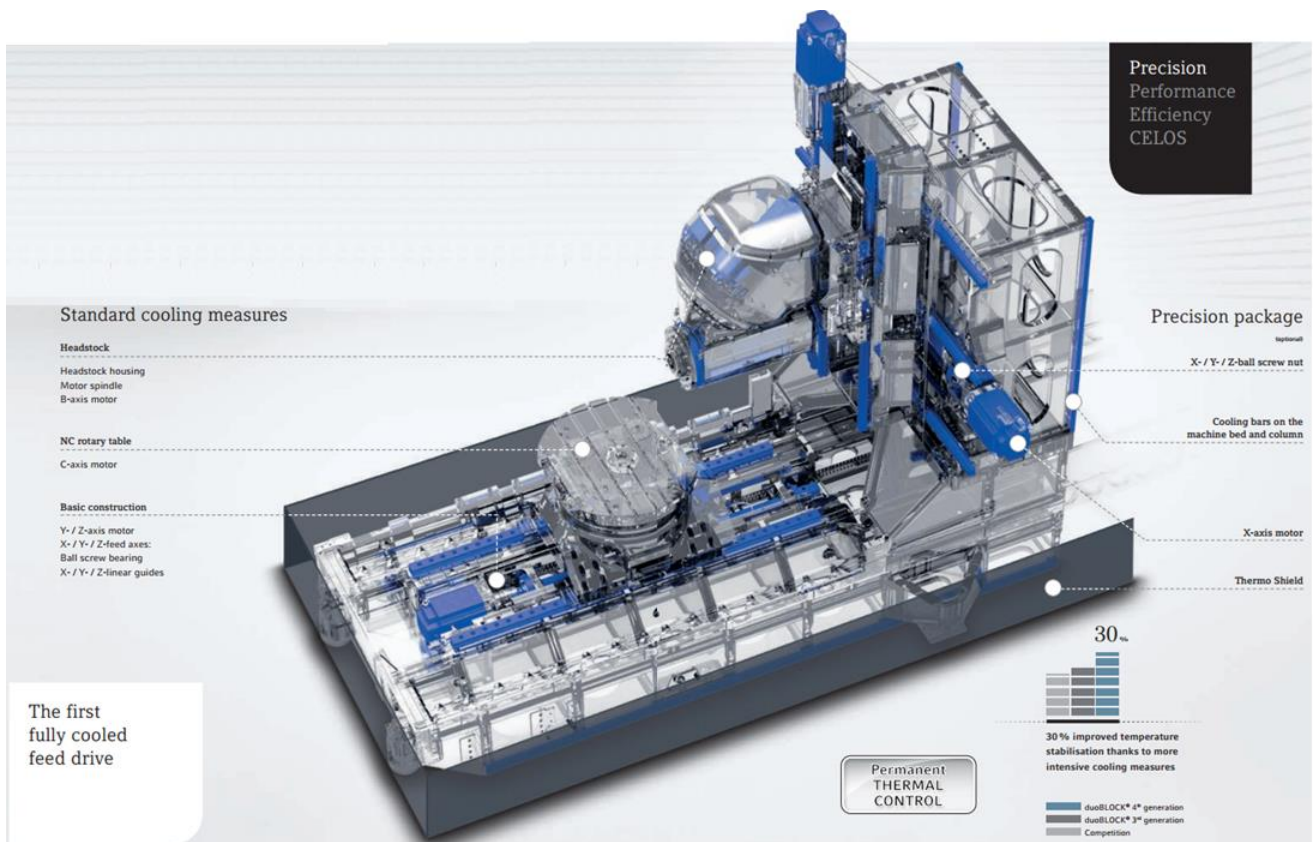
V tabulce jsou uvedeny střední hodnoty mechanických vlastností při 20 °C, stav : **ž** – žiháno, **dž** – duplexně žiháno, **kp** – kaleno a popuštěno (zušlechtěno)

PŘÍLOHA 3

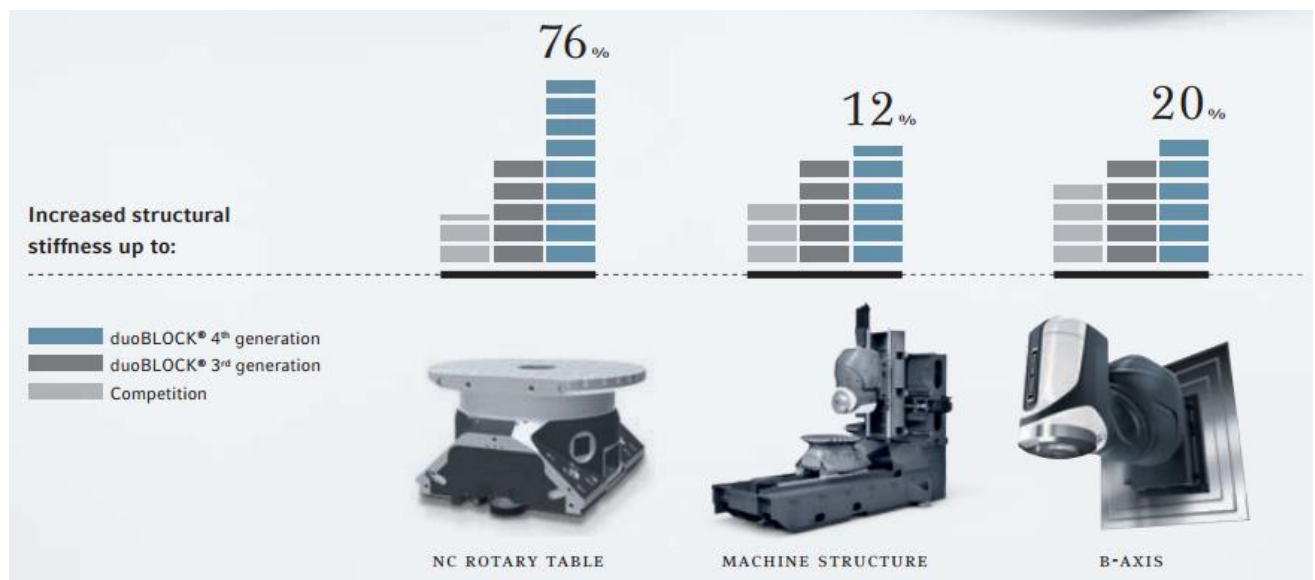
Technické parametry stroje DMC 80 FD DuoBlock [67].

		DMC 80 U / FD dB®
Working area		
X-, Y- and Z-axes	mm	800 × 1,050 × 850
Distance from spindle centre to table		
Horizontal milling head	mm	50 to 900
Vertical milling head	mm	–300 to 750
Distance from spindle nose to table		
Horizontal milling head	mm	–200 to 850
Vertical milling head	mm	150 to 1,000
Table / Workpiece mounting surface / Workpieces		
NC rotary table	rpm	40
Table size	mm	ø 800 × 630
Maximum table load	kg	1,400
Turn-mill table	rpm	800
Table size	mm	ø 800 × 630
Maximum table load	kg	1,200
NC-controlled swivelling milling head (B-axis)		Standard
Swivel range (0 = vertical / 180 = horizontal)	Degrees	–30 to 180
Rapid traverse and feed	rpm	30
Five-axis options		
NC-controlled swivelling milling head (A-axis)		•
Swivel range (0 = vertical / -90 = horizontal)	Degrees	–120 / +10
Rapid traverse and feed	rpm	30
Main drive		
Integrated SK40 motor spindle (turn-mill: HSK-A63)	rpm	12,000
Power (40 / 100 % DC)	kW	35 / 25
Torque (40 / 100 % DC)	Nm	130 / 86 (FD: 111 / 77)
Tool changer		
Tool holder		SK40
Tool magazine wheel	Pockets	63 (123 / 183 / 273 / 363)
Linear axis (X / Y / Z)		
Feed speed, rapid traverse speed	m/min	60
Acceleration	m/s²	7
Feed force	kN	13 / 13 / 9
P max. (X / Y / Z) – VDI DGQ 3441 / ISO-230-2	µm	5
P smax. (X / Y / Z) – VDI DGQ 3441 / ISO-230-2	µm	4
Machine data		
Space requirements of base machine plus chip conveyor, without internal coolant supply	m²	21.4
Machine height (standard machine)	m	3.4
Machine weight	kg	18,000

PŘÍLOHA 4



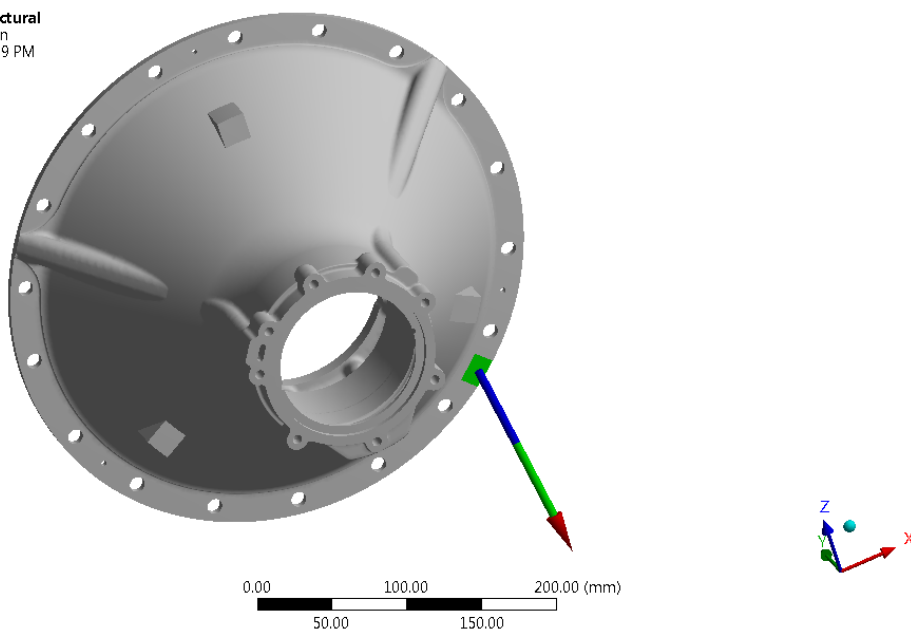
Chladicí systém stroje DMC 80 FD DuoBlock [67].



Procentní nárůst tuhosti oproti předešlým řadám [67].

PŘÍLOHA 5

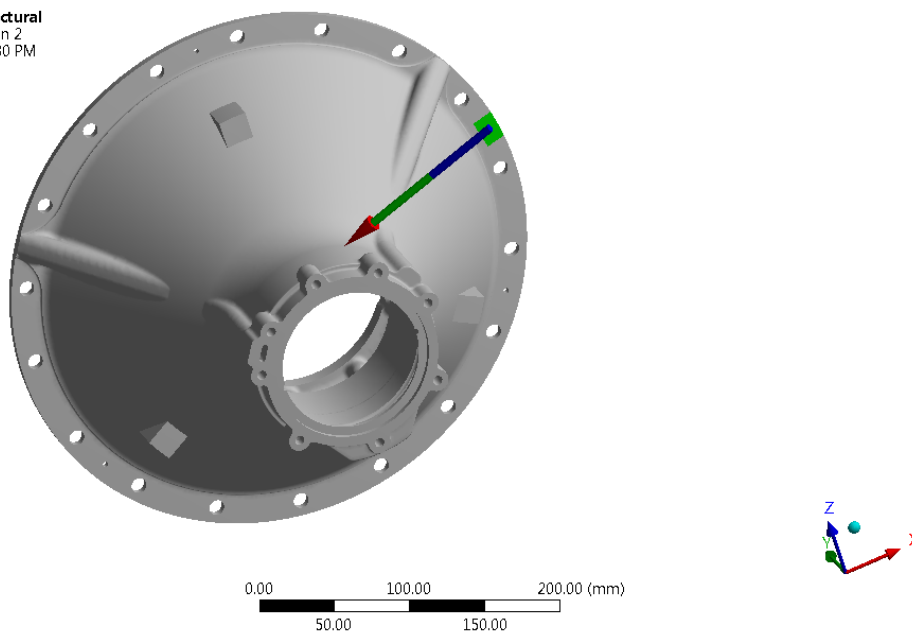
C: Static Structural
Force Reaction
5/12/2016 4:29 PM



Geometry / Print Preview / Report Preview /				
Tabular Data				
Time [s]	Force Reaction (X) [N]	Force Reaction (Y) [N]	Force Reaction (Z) [N]	Force Reaction (Total) [N]
1. 1.	17.834	-48.545	-165.89	173.77

Velikost silových Fx Fy Fz + Výsledná reakční síla upínky C.

C: Static Structural
Force Reaction 2
5/12/2016 4:30 PM

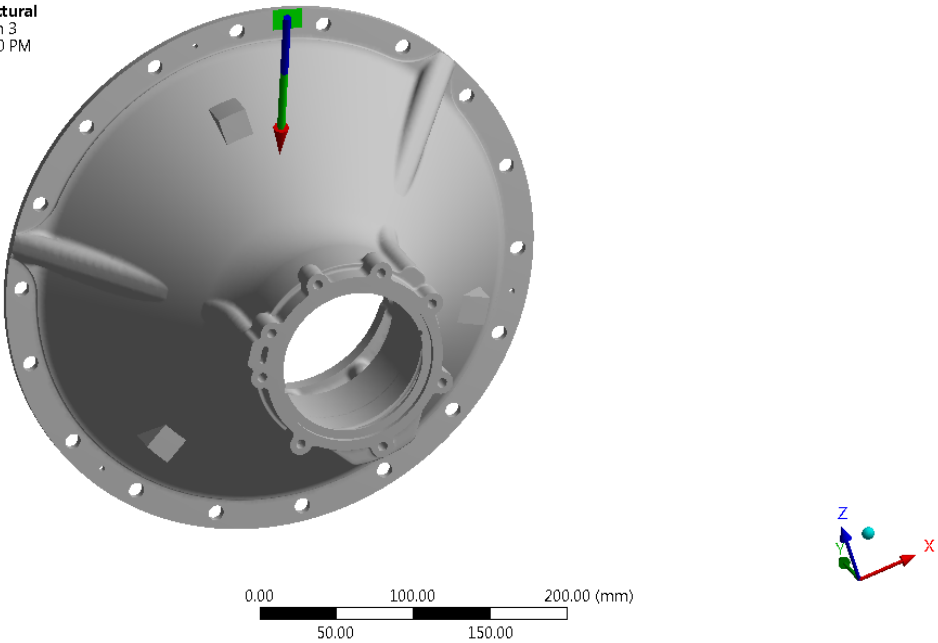


Geometry / Print Preview / Report Preview /				
Tabular Data				
Time [s]	Force Reaction 2 (X) [N]	Force Reaction 2 (Y) [N]	Force Reaction 2 (Z) [N]	Force Reaction 2 (Total) [N]
1. 1.	-108.23	56.901	-66.122	139.01

Velikost silových Fx Fy Fz + Výsledná reakční síla upínky D.

PŘÍLOHA 6

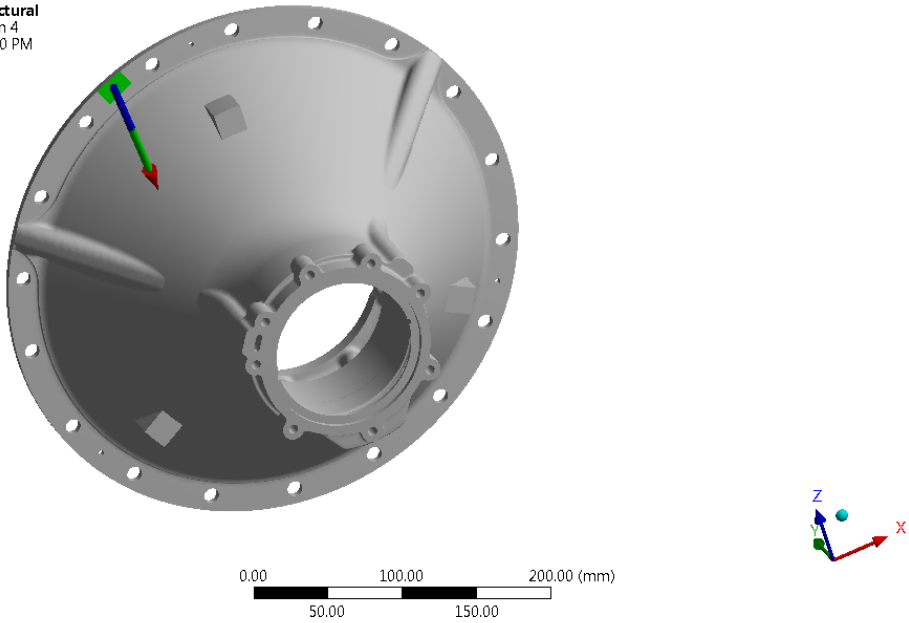
C: Static Structural
Force Reaction 3
5/12/2016 4:30 PM



Geometry / Print Preview / Report Preview /				
Tabular Data				
Time [s]	Force Reaction 3 (X) [N]	Force Reaction 3 (Y) [N]	Force Reaction 3 (Z) [N]	Force Reaction 3 (Total) [N]
1.	-48.452	96.044	-225.47	249.82

Velikost silových Fx Fy Fz + Výsledná reakční síla upínky E.

C: Static Structural
Force Reaction 4
5/12/2016 4:30 PM

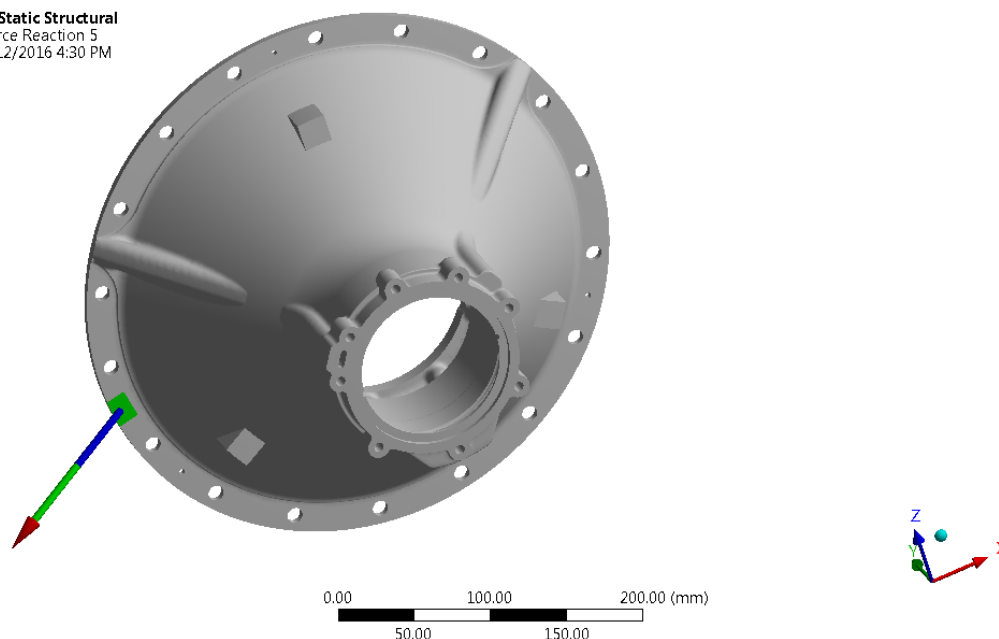


Geometry / Print Preview / Report Preview /				
Tabular Data				
Time [s]	Force Reaction 4 (X) [N]	Force Reaction 4 (Y) [N]	Force Reaction 4 (Z) [N]	Force Reaction 4 (Total) [N]
1.	11.838	38.031	-77.892	87.485

Velikost silových Fx Fy Fz + Výsledná reakční síla upínky F.

PŘÍLOHA 7

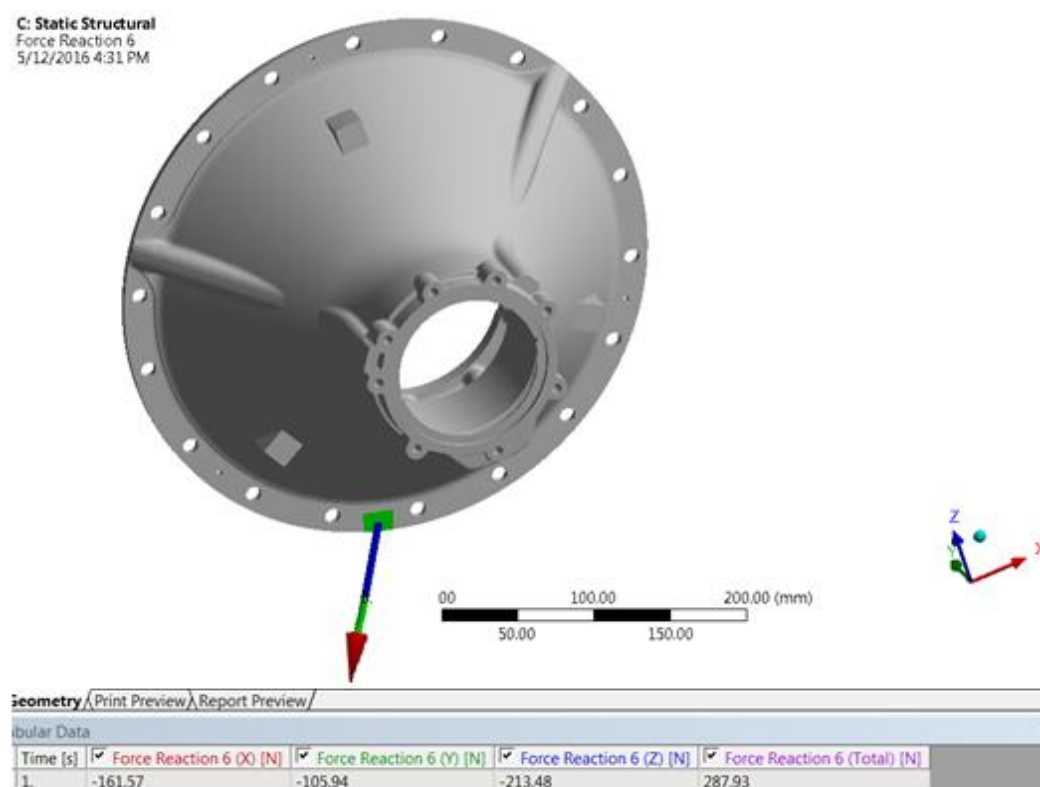
C: Static Structural
Force Reaction 5
5/12/2016 4:30 PM



Geometry / Print Preview / Report Preview /				
Tabular Data				
Time [s]	Force Reaction 5 (X) [N]	Force Reaction 5 (Y) [N]	Force Reaction 5 (Z) [N]	Force Reaction 5 (Total) [N]
1.	-127.95	-61.401	-41.612	147.9

Velikost silových F_x F_y F_z + Výsledná reakční síla upínky G.

C: Static Structural
Force Reaction 6
5/12/2016 4:31 PM

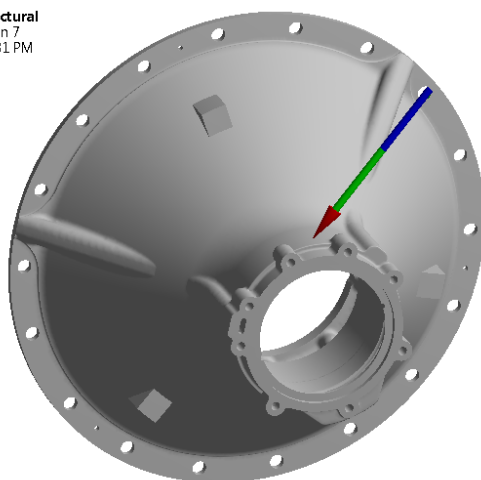


Geometry / Print Preview / Report Preview /				
Tabular Data				
Time [s]	Force Reaction 6 (X) [N]	Force Reaction 6 (Y) [N]	Force Reaction 6 (Z) [N]	Force Reaction 6 (Total) [N]
1.	-161.57	-105.94	-213.48	287.93

Velikost silových F_x F_y F_z + Výsledná reakční síla upínky H.

PŘÍLOHA 8

C: Static Structural
Force Reaction 7
5/12/2016 4:31 PM



0.00 100.00 200.00 (mm)
50.00 150.00



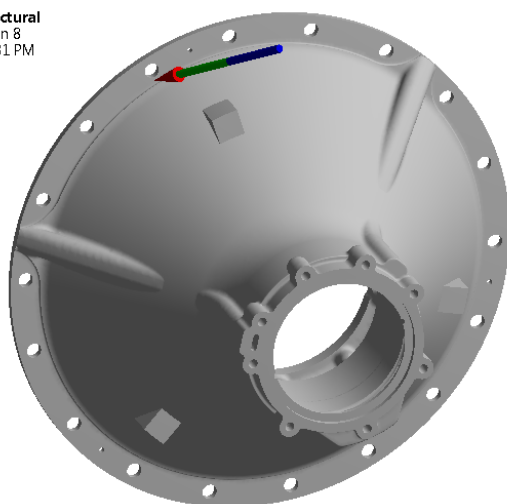
Geometry / Print Preview / Report Preview /

Tabular Data

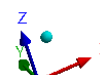
Time [s]	Force Reaction 7 (X) [N]	Force Reaction 7 (Y) [N]	Force Reaction 7 (Z) [N]	Force Reaction 7 (Total) [N]
1.	-163.07	-1.4028	-101.22	191.94

Velikost silových F_x F_y F_z + Výsledná reakční síla aretačního kolíku B.

C: Static Structural
Force Reaction 8
5/12/2016 4:31 PM



0.00 100.00 200.00 (mm)
50.00 150.00



Geometry / Print Preview / Report Preview /

Tabular Data

Time [s]	Force Reaction 8 (X) [N]	Force Reaction 8 (Y) [N]	Force Reaction 8 (Z) [N]	Force Reaction 8 (Total) [N]
1.	-15.142	24.906	-9.0585	30.523

Velikost silových F_x F_y F_z + Výsledná reakční dosedací plochy I.

PŘÍLOHA 9

Silová rovnováha reakčních složek F_x , F_y a F_z

Upnutí \ Silová složka	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]
Upínka 1	17.834	-48.545	-165.89
Upínka 2	-108.23	56.9	-66.122
Upínka 3	-48.452	96.044	-225.47
Upínka 4	11.838	38.031	-77.892
Upínka 5	-127.95	-61.401	-41.612
Upínka 6	-161.57	-105.94	-213.48
Aretační kolík	-163.07	-1.4028	-101.22
Dosedací plocha příruby	-15.142	24.906	-9.0585
Σ	-594.742	-1.4068	-900.745

Hodnoty silových složek vyplývající z teoretických výpočtů (4.3, 4.4):

$$F_f(F_x)=580 \text{ N}$$

$$F_c(F_z)=892 \text{ N}$$

$$F_p(F_y)=0 \text{ (zanedbáno)}$$

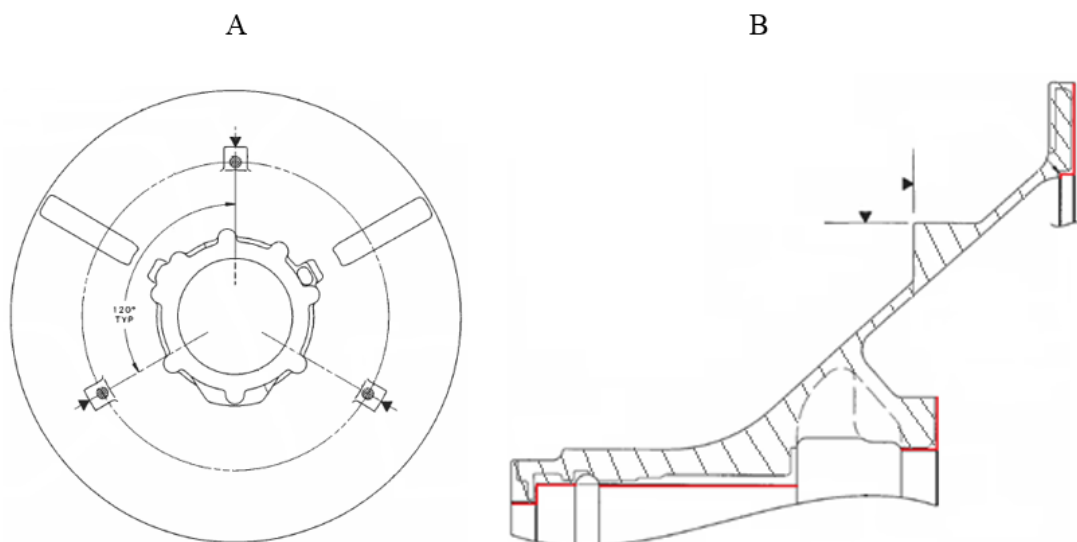
Z výsledků je zřejmé, že hodnoty se liší v rozmezí 3 %, což je způsobeno nepřesností rozložení a hustoty sítě modelu. Přesto můžeme říct, 3 % neshody jsou akceptovatelné.

PŘÍLOHA 10

Operace 2 - soustružení_zarovnání ploch a tvorba základen [66]

Výrobní stroj: CNC vertikální soustruh MOTCH 125 VNC

Způsob upnutí součásti: upínací hliníkové čelisti připevněné na sklíčidlo

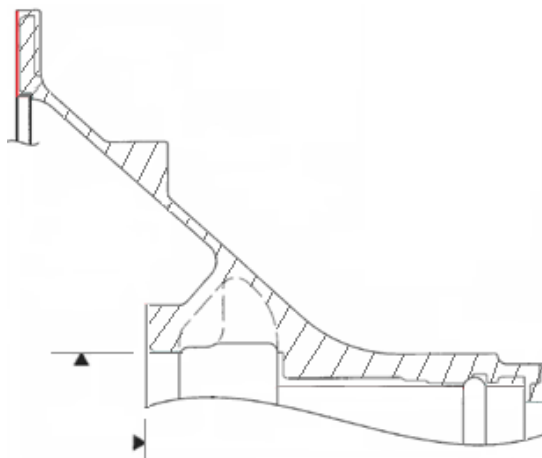


Přední pohled A, upnutí za 3 nálitky po 120°, zobrazení obrobených ploch B [66].

Operace 3 - soustružení-zarovnání plochy a tvorba základny [66]

Výrobní stroj: konvenční hrotový soustruh ROMI HDL 33-20

Způsob upnutí součásti: upínací hliníkové čelisti připevněné na sklíčidlo



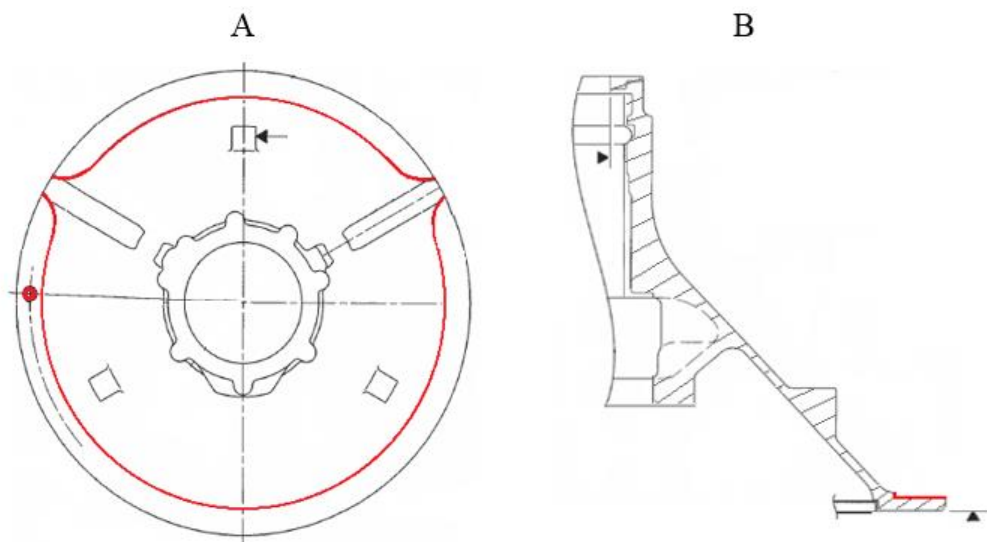
Upnutí dílce za vyznačené základny s následným soustružením čela [66].

PŘÍLOHA 11

Operace 4 - frézování čela a vrtání středící díry [66]

Výrobní stroj: obráběcí CNC centrum Lancer 1250

Způsob upnutí součásti: speciální polohovací přípravek k zajištění polohy

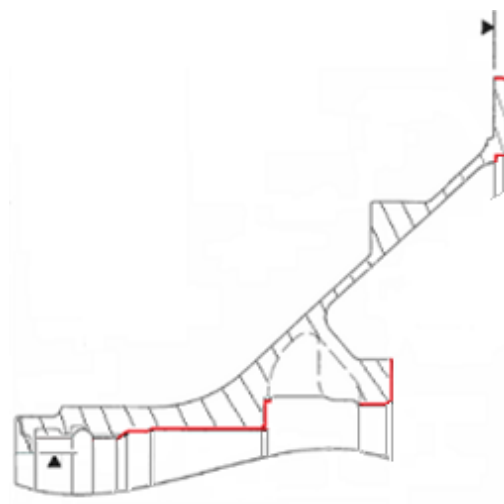


Upnutí dílce za vyznačené základny s následným frézováním čela a vrtáním středící díry [66].

Operace 6 - soustružení čel a vnitřních průměrů [66]

Výrobní stroj: CNC vertikální soustruh MOTCH 125 VNC

Způsob upnutí součásti: speciální polohovací přípravek k zajištění polohy



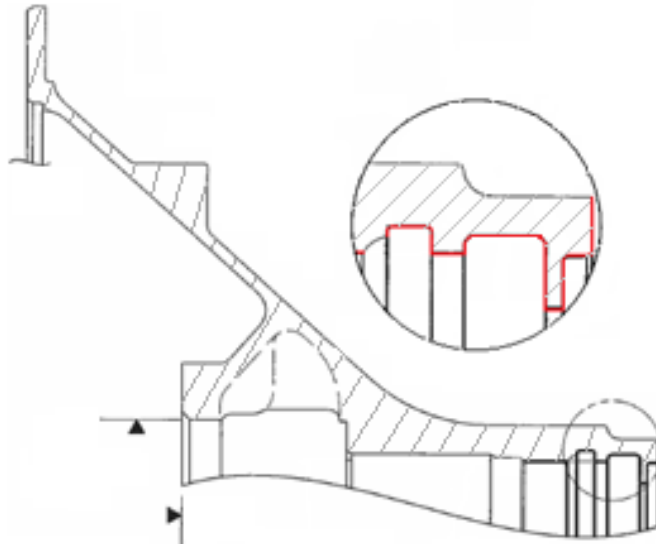
Soustružení čel, vnitřních a vnějších průměrů [66].

PŘÍLOHA 12

Operace 7 - soustružení čel a vnitřních průměrů [66]

Výrobní stroj: CNC vertikální soustruh MOTCH 125 VNC

Způsob upnutí součásti: upínací hliníkové čelisti připevněné na sklíčidlo



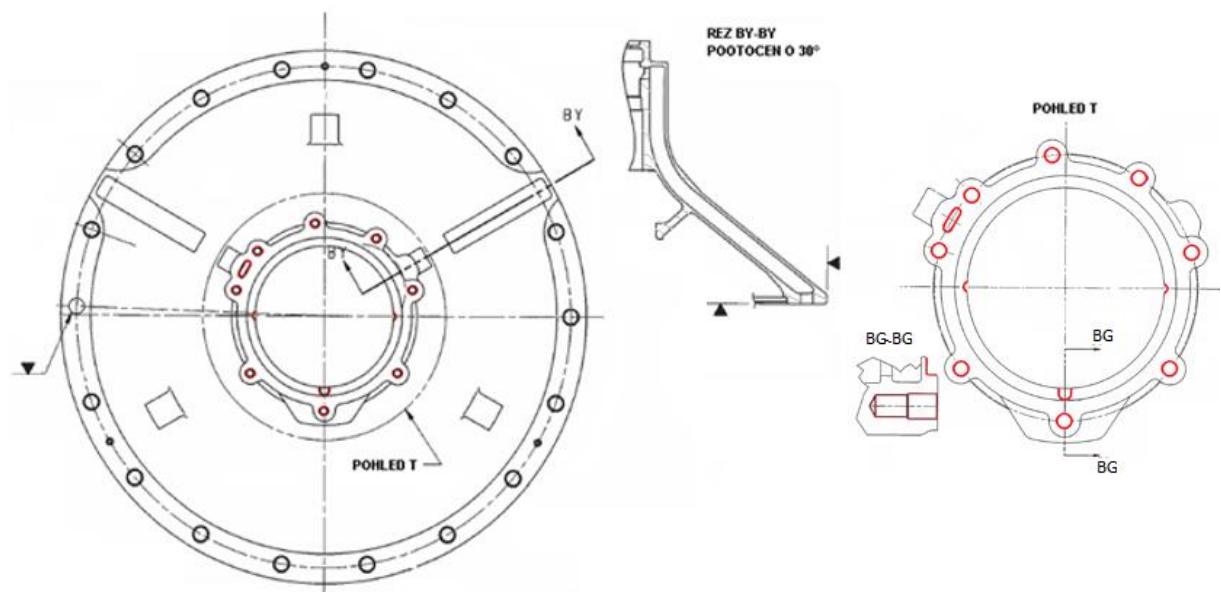
Soustružení čel a vnitřních průměrů [66].

PŘÍLOHA 13

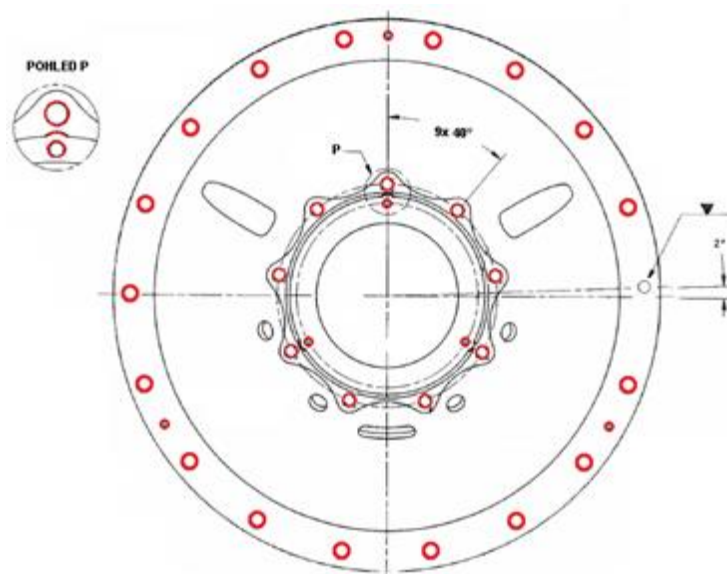
Operace 8 - frézování drážek a vrtání děr [66]

Výrobní stroj: obráběcí CNC centrum MITSUI SEIKI HS5A

Způsob upnutí součásti: speciální polohovací přípravek k zajištění polohy



Operace 8 vrtání, závitování a frézování [66].



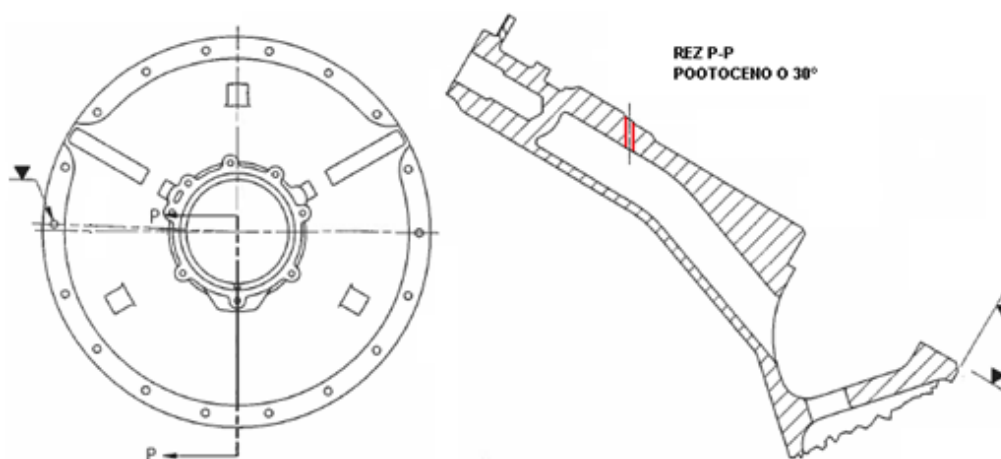
Operace 8 vrtání, závitování a frézování [66].

PŘÍLOHA 14

Operace 10 - vyjiskřování díry [66]

Výrobní stroj: elektroerozivní vyjiskřovací stroj ELENIX DRILL CT 300

Způsob upnutí součásti: speciální hliníkový polohovací přípravek

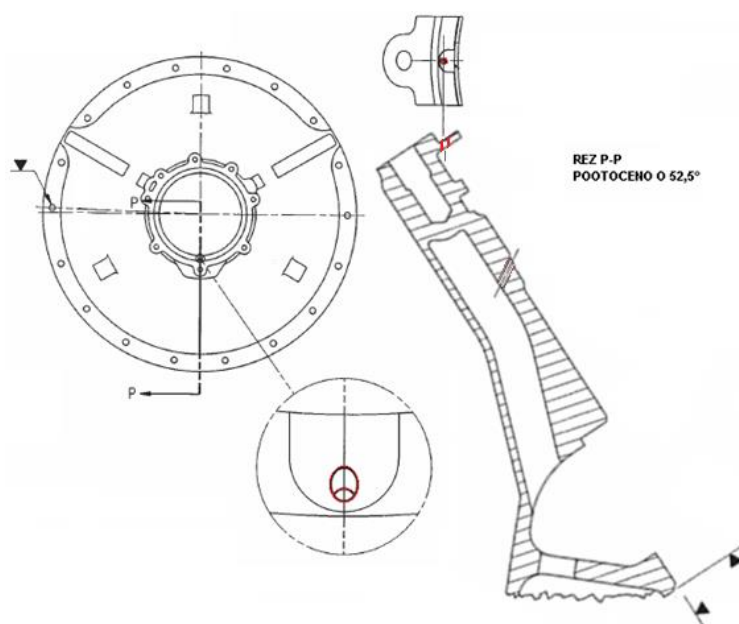


Řez P-P, upnutí dílce za základny s následným vyjiskřováním díry [66].

Operace 11 - vyjiskřování díry [66]

Výrobní stroj: elektroerozivní vyjiskřovací stroj ELENIX DRILL CT 300

Způsob upnutí součásti: speciální hliníkový polohovací přípravek

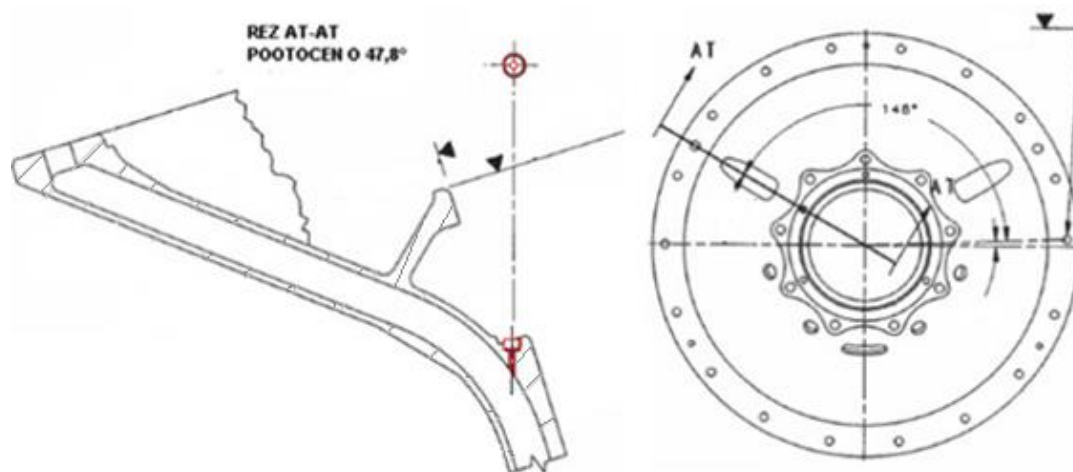


Řez P-P, upnutí dílce za základny H a J s následným vyjiskřováním díry [66].

PŘÍLOHA 15

Operace 12 - vrtání díry [66]

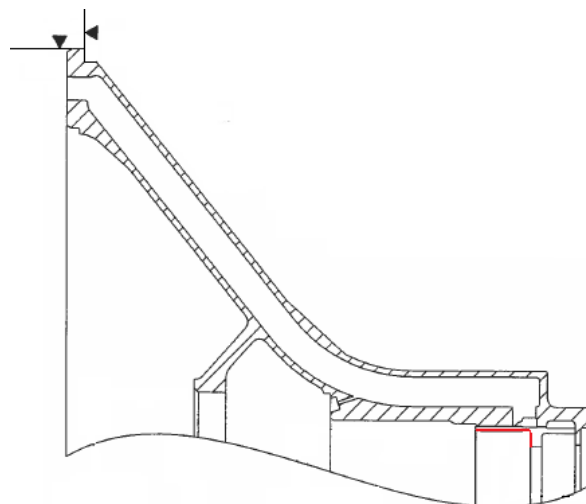
Výrobní stroj: vertikální vrtačka Avey DrillPress
Způsob upnutí součásti: speciální hliníkový polohovací přípravek



Řez AT-AT, upnutí dílce za základny s následným vrtáním díry [66].

Operace 20 - broušení vnitřního průměru a čela [66]

Výrobní stroj: bruska na kulato SI6/1 Ax 500
Způsob upnutí součásti: speciální polohovací přípravek k zajištění polohy



Upnutí dílce za základny s následným broušením vnitřního průměru a čela [66].

